

Санкт-Петербургский государственный университет

ВОРОБЬЕВ Вадим Анатольевич



Выпускная квалификационная работа

Особенности дешифрирования ледниковой поверхности по данным съемки БПЛА на территорию оазиса Холмы Ларсеманн

Уровень образования: *магистратура*

Направление 05.04.03 «*Картография и геоинформатика*»

Основная образовательная программа ВМ.5523.2019 «*Геоинформационное картографирование*»

Научный руководитель:

доцент кафедры картографии и
геоинформатики СПбГУ, к.г.н.,
Сидорина Инесса Евгеньевна



Рецензент:

младший научный сотрудник
Российского университета дружбы
народов (РУДН), к.г.-м.н.,
Дворников Юрий Александрович

Санкт-Петербург

2021

Содержание

Введение	4
Глава 1. Исследование Антарктиды с помощью ДДЗЗ.....	6
1.1. Ледниковый покров Антарктиды	6
1.2. Рельеф Антарктиды и антарктических оазисов	8
1.3. Дистанционные методы изучения Антарктиды.....	11
1.3.1. Аэрофотосъемка и космическая съемка.....	11
1.3.2. Съемка труднодоступных областей с помощью БПЛА (БВС).....	13
1.4. Антарктический оазис Холмы Ларсеманн	15
1.4.1. История изучения.....	15
1.4.2. Ледниковая часть	16
Глава 2. Особенности дешифрирования ледников и ледниковых поверхностей	19
2.1. Классификация ледников и их характеристика	19
2.2. Особенности рельефа ледниковых поверхностей	22
2.2.1. Формы рельефа поверхности ледников	22
2.2.2. Условные знаки для изображения рельефа ледников	24
2.3. Особенности дешифрирования и картографирования ледников и ледниковых поверхностей	26
Глава 3. Дешифрирование ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по данным съемки БПЛА	32
3.1. Данные съемки БПЛА и ортофотоплан на территорию оазиса Холмы Ларсеманн	32
3.1.1. Данные съемки БПЛА оазиса Холмы Ларсеманн	32
3.1.2. Автоматизированное построение рельефа	33
3.2. Редактирование горизонталей, построенных автоматизированным методом.....	34
3.3. Дешифрирование части ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по данным съемки БПЛА	38
3.3.1. Особенности дешифрирования ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн	38
3.3.2. Разработка топографической основы на часть ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн	39
3.3.3. Сравнение результатов дешифрирования с картами австралийской картографической службы	42

Глава 4. Разработка каталога форм рельефа ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн и рекомендации к дешифрированию	46
4.1. Назначение и структура каталога.....	46
4.2. Выделение сложных для дешифрирования форм рельефа и формирование первичного каталога объектов.....	48
4.3. Классификация форм рельефа и их характеристика	51
4.4. Рекомендации по дешифрированию форм ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн.....	56
Заключение.....	63
Литература	64
Приложение (Фрагмент каталога)	69

Введение

Ученые разных научных направлений с давних пор интересуются Антарктидой. Объектом многих исследований является ледяной щит Антарктиды, охватывающий около 98% площади континента и представляющий собой самое крупное скопление льда на Земле.

Одним из главных средств географической и пространственной информации являются карты, используемые как в целях изучения и анализа территории, так и для навигации. Работы по составлению карт на отдельные участки Антарктиды начались лишь во второй половине XX века ввиду сложности для освоения местности. Технологии классической аэрофотосъемки позволили проводить работы по картографированию местности.

Территория оазиса Холмы Ларсеманн, расположенного в Восточной Антарктиде, была открыта в первой половине XX века и на данный момент активно изучается. В 2017 году на участок оазиса впервые проводилась съемка с помощью БПЛА, благодаря чему стало возможно создание на него крупномасштабных топографических планов.

Свободная ото льда территория оазиса дешифрируется в соответствии с общепринятыми правилами и разработанными инструкциями, в большинстве своем являющимися общими для топографических планов. Ледниковая часть оазиса представляет собой сложную поверхность, требующую индивидуального подхода к дешифрированию микроформ и правильной интерпретации ортофотопланов. Формирование и реализация такого подхода значительно поспособствует работе над составлением топографических планов на территорию антарктического оазиса Холмы Ларсеманн и в целом является актуальной и современной задачей, поскольку Антарктида на сегодняшний день до конца не изучена и является привлекательной для проведения научных исследований.

Цель: изучение особенностей ледниковой поверхности антарктического оазиса Холмы Ларсеманн и формирование каталога с рекомендациями по ее дешифрированию для топографической основы масштаба 1:2000 по данным съемки БПЛА.

Задачи:

1. Изучить историю открытия и физико-географические особенности Антарктиды, антарктических оазисов, в частности оазиса Холмы Ларсеманн, методы исследования континента с помощью ДДЗ;

2. Рассмотреть классификацию ледников, особенности рельефа ледниковых поверхностей, используемые для их изображения на картах условные обозначения, ознакомиться с опытом дешифрирования и картографирования ледников;

3. Изучить алгоритм и выявить проблемы автоматизированного построения рельефа по данным съемки БПЛА, создать фрагмент топографической основы масштаба 1:2000 на ледниковую часть территории оазиса Холмы Ларсеманн;

4. Провести анализ ледниковой поверхности оазиса, сформировать набор наиболее сложных для дешифрирования форм рельефа и выполнить их классификацию;

5. Разработать каталог форм объектов ледниковой поверхности для ледника оазиса Холмы Ларсеманн с рекомендациями к дешифрированию.

Актуальность работы продиктована обширным интересом к изучению антарктических оазисов как уникальных природных комплексов, и, соответственно, необходимостью крупномасштабного картографирования территории.

Новизна работы заключается в исследовании и описании ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по данным крупномасштабной съемки 1:2000 с помощью БПЛА, проведенной на данную территорию впервые.

Практическая значимость работы состоит в дальнейшем использовании сформированного в рамках исследования каталога форм ледниковой поверхности оазиса, включающего в себя описание объектов рельефа, их изображение, технические рекомендации по картографированию и визуальные примеры дешифрирования.

Работа была апробирована на конференции «Большой Географический Фестиваль 2021», где была отмечена как лучшая в секции. Материалы конференции были опубликованы в специальном сборнике.

Глава 1. Исследование Антарктиды с помощью ДДЗЗ

1.1. Ледниковый покров Антарктиды

По усредненным показателям высоты Антарктида является самым высоким материком из всех. Благодаря массивному ледниковому покрову средняя высота континента составляет 2000 м над уровнем моря, в то время как значения остальных материков составляют примерно 870 м. Антарктида поделена на географические регионы – Западную и Восточную Антарктиду, граница между которыми проходит сначала по восточному склону Трансантарктического хребта, потом от севера гор Пенсакола к горам Терон и затем пролегает по восточному берегу моря Уэдделла.

Главным образом оледенение континента представляет гигантский материковый ледниковый щит (рисунок 1), занимающий территорию почти всей Восточной и Западной Антарктиды, а также значительную территорию Антарктического полуострова.

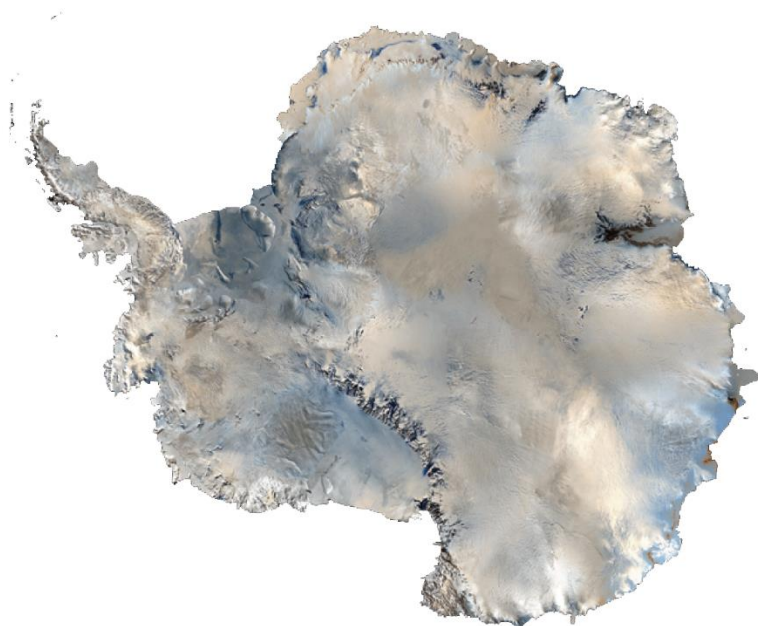


Рисунок 1. Антарктический ледяной щит (Swithinbank, 1988)

Общая площадь ледникового щита Антарктиды составляет 12 млн км², что в процентах около 88% общей площади оледенения. Ледниковый покров не является целиком наземным. На больших территориях он насаждает на шельф либо плавает в эпишельфовых морях, причем в пределах Западной Антарктиды так называемые «морские» элементы ледникового покрова местами превышают долю наземных.

Шельфовые ледники представляют собой гигантские плавучие ледяные плиты у края материкового ледникового покрова Антарктиды и являющиеся его морским продолжением. Шельфовое оледенение материка представлено главным образом ледниками Росса и Ронне-Фильхнера, расположенными в Западной Антарктиде и занимающими площадь около 1 млн км² (Грушинский, 1988).

Составляющие оледенение Западной Антарктиды ледники преимущественно являются «внутренними», Восточная Антарктида за исключением ледника Эймери представлена внешним типом оледенения (образования прилегают к берегу и вследствие этого подвержены процессам деформации и развала). Это является ключевой причиной явного проявления признаков разрушения ледников-шельфов в Восточной Антарктиде, из-за чего их общая площадь постоянно сокращается. Кроме того, около половины выводных ледников региона не впадает в ледники-шельфы, а имеет свободный фронт отёла (Гросвальд, 1983).

Ледниковый щит Восточной Антарктиды отличается не только большой площадью, но и внушительной толщиной покрова. Его средняя толщина по разным оценкам достигает 2630 м. Щит Западной Антарктиды, напротив, уступает Восточному не только в размерах, но и в толщине, которая в среднем составляет около 1100 м при средней высоте 910 м. В среднем ложе ледника здесь залегает на 390 м ниже уровня моря. Самой же высокой частью всего щита является точка около Полюса относительной недоступности, высота которой превышает 4000 м.

От центра ледникового щита к его краям поверхность имеет тенденцию к постепенному понижению, заметно приобретая крутизну ближе к границе с океаном. На расстоянии от 10 до 100 км от края щита рельеф его поверхности демонстрирует влияние неровностей подледного рельефа, гребни отдельных горных вершин и хребтов выступают над ледниковым покровом в виде нунатаков (окруженных льдом скалистых пиков). В случае совпадения направления подледных долин с общим направлением движения льда образуются выводные ледниковые потоки, которые разделены застойными зонами ледяных скатов в местах, препятствующих движению ледника (Бардин, 1989).

Из особенностей Антарктического шельфа можно выделить его значительную площадь (более 5,5 млн км²), атипичную глубину залегания, обратный наклон поверхности, наличие продольных и поперечных желобов-трогов и др. Перечисленные отличительные черты ледникового шельфа континента сильно выделяются на фоне шельфов других материков, таких как Австралия, Юго-Восточная Азия и других внеледниковых областей Земли.

Ледниковая поверхность Антарктиды является сплошной областью питания, скорости движения ее отдельных участков возрастают от центра к периферии, что является вполне объяснимым и закономерным явлением. На больших площадях ледник имеет талое основание и скользит по ложу.

При общей площади ледникового покрова Антарктиды лишь менее 2,4% от всей поверхности континента не являются ледниками, представляя свободные ото льда территории. В основном они представлены вершинами горных хребтов, выступающими из-под льда, обособленными нунатаками и антарктическими оазисами (Котляров, 1965).

Основными каналами стока льда из внутренних районов антарктического ледникового покрова являются выводные ледники, которые можно разделить на несколько групп:

- языки, текущие по долинам со скалистыми берегами (выводные ледники Трансантарктических гор, Антарктического п-ова и других горных районов материка);
- ледяные потоки в ледяных берегах (большинство ледников индийского сектора Восточной Антарктиды и тихоокеанского сектора Западной Антарктиды к западу от ледника Росса)

Выводные ледники обладают широким разнообразием форм и размеров, представленным от гигантских ледяных «рек» в ледяных берегах длиной в несколько сотен километров (при длине более 500 км ширина ледника Ламберта при переходе в ледник Эймери составляет примерно 30 км) до ледников со слабо выраженным каналом стока и невнятными очертаниями (ледник Позадовского) (Долгушин, Осипова, 1989).

1.2. Рельеф Антарктиды и антарктических оазисов

Антарктида является самым высоким материком благодаря ледниковому покрову - средняя высота составляет 2000 м над уровнем моря против средней высоты всех материков - 870 м, однако средняя высота поверхности коренных пород равна 110 м 9 (рисунок 2).



Рисунок 2. Физическая карта Антарктиды (<https://bigenc.ru>)

Поверхность Восточной Антарктиды характеризуется относительно ровным высоким Восточно-Антарктическим куполом, становясь практически горизонтальной в центральной части. Пробивающиеся из-под льда горные хребты и их вершины (например, вершина горы Керкпатрик - 4528 м), являются пиками высот этой географической зоны (Ермаков, Игнатьев, 1988). Наивысший участок территории ледникового щита находится в районе плато Советского (4000 м) на подледных горах Гамбургцева высотой 3355 м, что делает среднюю высоту восточной зоны материка более 2000 м (Власова, 1986).

Западная Антарктида представлена более разнообразным рельефом. На горные цепи Антарктического полуострова и Земли Мэри Бэрд приходится наивысшая точка материка – 5140 м (массив Винсон, хребет Сентинел). Поверхность ледниковых образований зоны лежит в пределах 2600 м над уровнем моря, а средняя высота составляет 910 метров (Ермаков, Игнатьев, 1988).

Рельеф материка в основном состоит из обширных равнин шельфовых ледников, тяготеющих к побережью Антарктиды и нередко выходящих на поверхность омывающих морей (ледник Росса и Ронне-Фильхнера, Западная Антарктида) (Ермаков, Игнатьев, 1988). На побережье в местах наибольших понижений, а также в горных долинах, распространены выводные ледники, с помощью которых происходит отток

льда из внутренних частей к морю и откалывание поверхностных частей ледников в виде айсбергов (Власова, 1986).

Стоит отметить, что в Антарктиде представлено все существующее многообразие морфогенетических типов ледников. Так, на пологих горных вершинах и на островах наблюдаются островные ледниковые покровы (купола), а на территории самого материка встречаются все типы горных ледников и подземные льды (Ермаков, Игнатьев, 1988).

В западной части континента поверхность представлена Антарктическими Андами - продолжением Анд Южной Америки. Горные образования сложены метаморфизованными отложениями мезозоя и породами вулканического происхождения. С востока к Антарктическим Андам примыкает краевой прогиб раннемезозойского периода.

Рельеф антарктических оазисов можно охарактеризовать как мелкосопочный структурно-экзарационный и холмисто-котловинный. В основном он представлен скалистыми мелкосопочниками. Среди самых встречаемых пород можно выделить гнейсы, сланцы, граниты, которые обладают особой устойчивостью к процессам денудации. На формирование рельефа оазисов огромное значение оказали разделительные (дизъюнктивные) дислокации и деформации, вследствие которых на территории оазисов образовались сети разломов. Структурно-тектонические разломами определяется общий облик побережья оазисов.

Покровное оледенение в качестве экзогенного процесса сыграло ключевую роль в формировании рельефа как самого континента, так и побережья антарктических оазисов. Сила воздействия льда на поверхность оценивается с учетом содержания моренного материала во льду и скорости движения ледникового покрова. Ледники ежегодно сносят с поверхности коренных пород слой примерно в 0,05 мм, что сопоставимо с интенсивностью разрушения равнин реками.

Среди процессов выветривания в формировании рельефа оазисов наибольшее влияние оказывают химическое и физическое выветривание. Самым интенсивным считается морозное выветривание, результатом которого является образование россыпей элювиально-делювиальных отложений и заполнение котловин рыхлым материалом. Физическое выветривание проявляется в отслаивании поверхностных слоев горных пород, из-за чего рельеф скал разрезается многочисленными трещинами на отдельные плиты, которые сползают и обнажают свежие поверхности коренных пород, образуя у подножия каменные россыпи и осыпи (Симонов, 1971).

Размывание поверхности талыми водами снежников — еще один вид физического разрушения пород. Ветер приносит массы снега и песок с мелким гравием, оказывая корродирующее действие на поверхность скал осуществлением эолового выветривания с последующим образованием борозд, «котлов» выдувания и каменных «волн».

1.3. Дистанционные методы изучения Антарктиды

1.3.1. Аэрофотосъемка и космическая съемка

Создание начальной геодезической и картографической основы на территорию Антарктиды было продиктовано необходимостью обеспечить научные исследования материка полноценными пространственными и картографическими данными. Задачи по её составлению осуществлялись геодезистами и топографов (Yuskevich, 2008). Значимым аспектом работ стала аэрофотосъемка поверхности Антарктиды, которая в совокупности с проведением геодезических, гравиметрических съемок и разносторонних дистанционных изучений была выполнена с привлечением авиации аэрофотосъемочного отряда. (<https://tankasan.livejournal.com>).

Работы были начаты 1956 году и осуществлялись специалистами в области геодезии и картографии для создания территориальных карт материка в масштабах от 1:50 000 до 1:1 000 000. За период с 1956 по 1962 гг. в восточной географической зоне Антарктиды была проведена аэрофотосъемка местности на площадь 50000 км² с акцентом на прибрежные, свободные ото льда районы на глубину до 200 км. Пролагались маршруты для съемки и вглубь материка, достигавшие 400 км (www.kramola.info).

В целом аэрофотосъемка имеет широкое прикладное значение в Антарктиде, например, для обеспечения логистики на территории отечественных полярных станций. В этих целях используются суда разного типа и класса, для которых организовываются регулярные рейсы, выполняемые со взлётно-посадочных полос на ледниках (Пряхин, 2015).

Одним из основных моментов, влияющих на выполнение съемки, являются погодные условия. К сожалению, атмосферные осадки и туман создают оптические искажения, с которыми трудно работать при камеральной обработке изображений. Чтобы предотвратить неблагоприятное воздействие метеорологических условий и рекомендуемые условия освещенности, следует проводить аэрофотосъемочные работы при ясной погоде в вечернее или утреннее время (Бляхарский, 2019). При падении солнечного света на поверхность под углом менее 45° относительно горизонта

образовывается боковое освещение объектов, что дает возможность получить более контрастные фотоснимки с четко выделяющимися объектами, которые могут быть «замаскированы» при более высоком положении Солнца (Пряхин, 2015).

Активное развитие и широкое распространение относительно доступных дистанционных технологий мониторинга оледенений дало возможность оценки изменения береговой линии практически всего материка. Всемирные аэрокосмические агентства интегрируют данные дистанционного зондирования краевой части ледникового покрова Антарктиды и представляют их в виде картограмм сети покрытия космическими снимками различного диапазона. Данные снабжаются каталогами изображений, для краевой зоны отдельных выводных и шельфовых ледников они имеют более подробный характер и включают снимки видимого спектра в ограниченном временном интервале. Такие изображения визуализируют периоды активных подвижек и откол массивных айсбергов. (Котляров и др., 2003).

Одним из важных аспектов изучения ледников, в котором данные дистанционного зондирования оказывают большую помощь, является определение фронта отела ледника (место, где заканчивается ледяной покров и начинается океан или морской лед) и базальных трещин (Fengming, 2016; Luckman, 2012; McGrath, 2012). При изучении фронтов отела важно иметь в виду, что поведение ледников сильно отличается от случая к случаю, поскольку не только внутренние динамические факторы льда, но и внешние факторы (например, рельеф дна, климат) влияют на скорость отела и колебания фронта. Изменения в расположении фронта отела рассматриваются как ранний признак дальнейших динамических изменений льда. Мониторинг и анализ изменений в отступающих и наступающих фронтах необходим для того, чтобы определить движущие силы, лежащие в основе динамики этого процесса (Baumhoer, 2018; Holt, 2013).

Одним из методов, который испытал более быстрый рост за последнее время, является радар с синтетической апертурой (SAR). Оценка баланса массы ледяных щитов важна из-за их потенциального вклада в повышение уровня моря и развитие методов получения высокоточных данных о таких параметрах ледников, как размер, вектор движения и скорость движения с помощью ДДЗ позволяет осуществлять над ними мониторинг и в перспективе контролировать их насколько это подвластно человеку (<http://www.antarcticglaciers.org>).

Радиолокационная интерферометрия является широко используемым дистанционным методом измерения мелкомасштабных сдвигов на поверхности Земли, в том числе и движения ледников (Zhou, 2014). Можно говорить о том, что радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (InSAR)

рассматривается как высокоинформативный метод дистанционного зондирования для обнаружения изменений ледников и изучения механики ледников. Встречаются также и другие методы для осуществления мониторинга показателей ледников. Среди них мониторинг ледника с использованием отслеживания смещения частотной области, контролируемое интерферометрическое моделирование, метод отслеживания интенсивности SAR с использованием алгоритма перекрестной корреляции, метод когерентного детектирования сдвига по амплитуде сигналов пары радиолокационных изображений, 3D-декомпозиция и др. (Roberson, 2010). Все эти методы, применяемые к данным дистанционного зондирования, позволяют всесторонне исследовать ледниковые поверхности.

1.3.2. Съемка труднодоступных областей с помощью БПЛА (БВС)

Беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) называется летательный аппарат без экипажа на борту, поднимаемый в воздух аэродинамическим принципом создания подъемной силы с помощью фиксированного или вращающегося крыла, который оснащен двигателем. БПЛА снабжаются полезной нагрузкой и рассчитаны на продолжительность полета, которой хватит для выполнения поставленных перед исследованием задач (Зинченко, 2011). В современной научной среде синонимом к аббревиатуре БПЛА является БВС (беспилотное воздушное судно).

Современный технологический уровень, на котором создаются БПЛА, является привлекательной альтернативой спутниковым данным для исследований в области гляциологии (Teng, 2020). Имея в своем арсенале все необходимое для изысканий оборудование, функциональные особенности и специализированное программное обеспечение для работы с данными, беспилотные летательные аппараты способны оказать значительную помощь в изучении труднодоступных территорий, в том числе и ледниковых поверхностей, которые не всегда находятся в зоне досягаемости человека для проведения полевых работ (Dąbski, 2020).

Одним из главных преимуществ БПЛА является возможность их полной автоматизации за счет снабжения предварительно разработанными программами полета, рассчитывающими необходимое покрытие изучаемой территории для ее оптимальной съемки. Также аппараты оснащаются бортовым автопилотом для следования по заданному курсу и датчиками синхронизации с Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Автоматически заполненный файл журнала, содержащий

предварительные параметры ориентации каждого снимка, позволяет оптимизировать процесс обработки исходных изображений (Toro, 2018; Whitehead, 2014).

Недостатки у БПЛА, сдерживающие повсеместное надежное внедрение в гляциологические исследования, присутствуют. Несмотря на стремительное развитие технологий и совершенствование конструкции летательных аппаратов, их прочность зачастую не в состоянии противостоять холодному климату ледниковых регионов. Зимой и в других условиях, когда температура падает ниже нуля градусов, у наиболее используемых в современных БПЛА литиево-полимерных батарей значительно падает заряд. Помимо низких температур, проблемы возникают с сильными ветровыми потоками, которые аппараты некоторых моделей не в силах игнорировать.

Справедливо отметить еще один, не объективный, но вполне влиятельный минус. Важная проблема, препятствующая прогрессу применения БПЛА в гляциологии, носит политический характер. Для съемки на участках местности, которые являются пограничными, как в случае с горами, концентратами горных оледенений, требуется согласование между обеими странами, на чьей территории будет производиться съемка. Многие арктические страны (Россия, США, Гренландия, Канада) заключили некоторые правила в области регулирования таких полетов в отличие от гималайских стран (Непал, Индия, Пакистан), до сих пор не вводивших управление и контроль таких вопросов в гражданских и исследовательских целях (Bhardwaj, 2016).

Дополнительным ограничением метода получения данных с использованием БПЛА выступают различные оптические помехи, такие как солнечные блики, которые «зашумляют» снимки и на этапе их обработки могут помешать корректному совмещению в единую мозаику (Зинченко, 2011).

Объем работ, нацеленный на крупномасштабное картографирование с использованием БПЛА, в настоящее время уступает инженерным исследовательским работам. Несмотря на это, осуществление мониторинга снежного покрова, изучения его толщины и пространственного распределения преимущественно реализуется именно с помощью беспилотных летательных аппаратов. Тем не менее, применение БПЛА при картографировании до сих пор не является абсолютной альтернативой, а выступает лишь дополнительным инструментом и может частично замещать только методы ДДЗ, РЛС и классической аэрофотосъемки (Медведев, Алексеенко, 2017).

1.4. Антарктический оазис Холмы Ларсеманн

1.4.1. История изучения

Оазис Холмы Ларсеманн, площадь которого составляет около 40 км², расположен между оазисом Вестфолл и шельфовым ледником Эймери на юго-восточном берегу залива Прюдс, Земля принцессы Елизаветы, Восточная Антарктика. Его образуют полуострова Сторнес и Брокнес, четыре мыса и порядка 130 прибрежных островов. Территория оазиса Холмы Ларсеманн (рисунок 3) является особо управляемым районом Антарктики (ОУРА) № 6, в свою очередь полуостров Сторнес является особо охраняемым районом Антарктики (ООРА) № 174 (<http://www.ats.aq>).

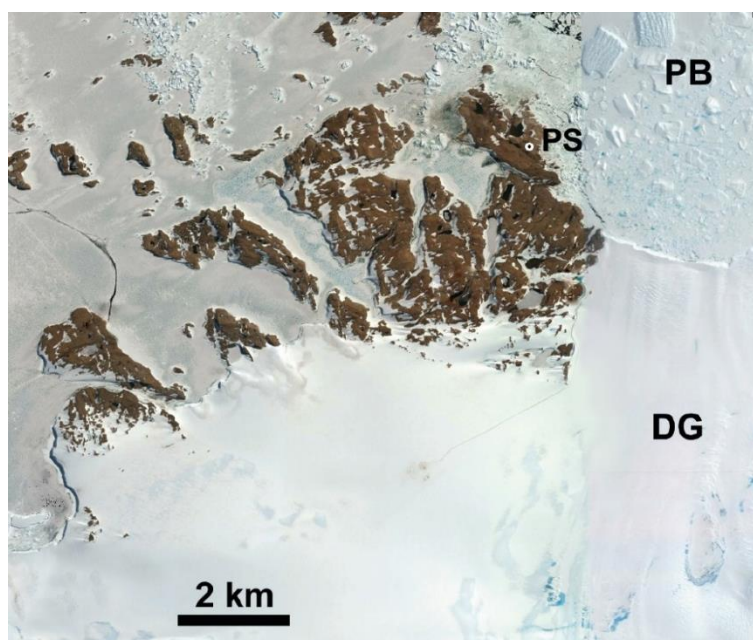


Рисунок 3. Оазис Холмы Ларсеманн (мозаика Google Earth). PS - Станция "Прогресс", DG - ледник Долк, PB - залив Прюдз (Florinsky, 2018)

Впервые оазис Холмы Ларсеманн был открыт нанесен на карту норвежскими картографами в ходе экспедиции под руководством Клариуса Никкельсена в 1935 г. Исследовательская деятельность на территории холмов начала развиваться лишь в 1986-1989 гг. с построением первых полярных станций.

В восточной части полуострова Брокнес помимо австралийской летней базы Лоу и китайской научной станции Зонгсан находятся две российских научных станций - Прогресс 1 и Прогресс 2. Южнее полуострова находится ледниковое плато, на территории которого Россия учредила 2000-метровую взлетно-посадочную полосу. В

настоящее время станция Прогресс (бывшая Прогресс 2) функционирует круглый год наравне с китайской Зонгсан индийской Бхарати, возведенной в 2012-2013 гг.

В течение года на станциях проводятся научные изыскания в области гляциологии, метеорологии, сейсмологии, осуществляются спутниковые наблюдения. Организовываются полевые экспедиции под руководством специалистов в сфере геологии, гляциологии, гидрологии, геоморфологии, экологии, биологии и антропогенных воздействий (<http://www.ats.aq>).

1.4.2. Ледниковая часть

Ледниковая часть оазиса Холмы Ларсеманн в основном представлена ледником Долк (Dalk Glacier), который располагается восточнее самих холмов, являющихся вторым по величине из четырех основных свободных оазисов побережья залива Прюдс (Stüwe, 1989). Сам ледник имеет протяженность 15 км и впадает в юго-восточную часть залива между холмами Ларсеманн и Штейннес (Steinnes), образуя плавучий ледяной язык длиной около 8 км и шириной 3 км.

Долк представляет собой выводной ледник, расположенный на побережье Ингрид Кристенсен, Восточная Антарктида. Ледник назван в честь острова Далк, лежащего на краю ледника и является одним из ключевых выходов, которые способствуют осушению ледяного покрова Восточной Антарктики.

Ледник Долк является типичным выходным ледником с отелом шириной 3,3 км, который примыкает к Восточно-Антарктическому ледяному щиту и течет на север в Южный океан. Ледяной отел, под которым понимается откалывание айсбергов, представляет собой отрыв глыб льда с края ледника. Это сложный процесс, на который влияют несколько факторов, включая атмосферное, океанографическое и гляциологическое воздействие. Фронт отела ледника Долк постоянно производит айсберги, которые контролируют состояние местного морского льда в заливе Прюдз (Songtao, 2019).

На основе анализа ледовых объектов в бухте Восточная можно сделать вывод о том, что вблизи восточного побережья полуострова Миррор и некоторых островов восточной части пролива Нелла находится полоса из обломков айсбергов мелкого и среднего размера. Основная масса айсбергов, располагающихся в бухте Восточной, приносится шельфовым ледником Вестерн и выводным ледником Долк (Захаров, 2003).

Исследования, сосредоточенные на морфологии и скорости льда ледника Долк, а также исследования долгосрочных динамических изменений демонстрируют

результаты, связанные с продвижением ледника. На рисунке показано, что ледник представляет собой чередующуюся картину между продвижением и отступлением с 2003 по 2017 год. Конечная точка ледника отступала в 2006, 2009, 2010 и 2016 годах и продвигалась в другие годы. Наиболее значительное отступление произошло в 2016 году, когда площадь сократилась примерно на 2,19 км². Массивные айсберги отделились в феврале и марте 2016 года, и последующая фрагментация в течение зимы привела к самой большой потере площади в этот период.

Миссия Sentinel-1 позволила практически непрерывно контролировать ледник с 2016 года, предлагая возможность обнаружения событий отела в полярную ночь и сезонных или субсезонных колебаний скорости. Сочетание оптических данных и данных SAR не только преодолевает влияние облаков и ночи, но и улучшает детали обнаружения изменений. Это позволило подтвердить закономерность чередования наступления и отступления ледника и добавить больше деталей к позициям конечных точек в период с 2000 по 2019 год.

Исследования, основанные на данных дистанционного зондирования, проанализировали долгосрочные межгодовые временные ряды скорости и сделали вывод о том, что межгодовое ускорение ледников лежит в основе 5-летнего цикла. В 2007, 2012 и 2017 годах годовая скорость фронта ледника увеличилась. Поверхностная скорость ледника Долк демонстрировала значительные сезонные колебания.

Согласно другим исследованиям шельфовых ледников и ледников в Восточной Антарктиде, увеличение скоростей в летнее время, скорее всего, связано с условиями морского льда, от чего зависит и сезонное изменение скорости ледника Долк. Анализ межгодовых вариаций скорости и изменений положения конечной точки показывает, что ускорение ледника Долк коррелирует с отступлением конечной точки. Ускорения в 2007 и 2017 годах были связаны с крупными распадами в 2006 и 2016 годах, в то время как поверхностная скорость увеличилась в 2012 году после непрерывных мелких отелов в 2009 и 2010 годах. Результаты исследования показывают циклическое поведение изменений ледника Долк, конечное положение которого лежит в основе 3-5-летнего цикла, когда ледник отступает в 2006, 2009, 2010 и 2016 годах и продвигается в другие годы. Ускорение часто происходит после отела и отступлений. Кроме того, распады способствуют потере прочности ледяного комка и вызывают соответствующее увеличение скоростей в различных регионах (Chen, 2020).

Мониторинг продвижения кромки выводного ледника Долк (рисунок 4), проводимый с помощью радиолокационной съемки в период с 15 февраля 2011 года по

декабрь 2011 года включительно (<https://cyberpedia.su>), также позволил заключить несколько выводов:

- продвижение выводного ледника Долк имеет пульсирующий характер, в рамках которого можно выделить периоды ускоренного движения (летний - май-август) и замедленного движения (остальное время года);
- различные части фронта ледника могут продвигаться одновременно и с различными скоростями, что может быть аргументировано неоднородностью коренной породы под некоторыми участками самого ледника;
- самые крупные отелы происходят в период максимальных скоростей движения ледника.

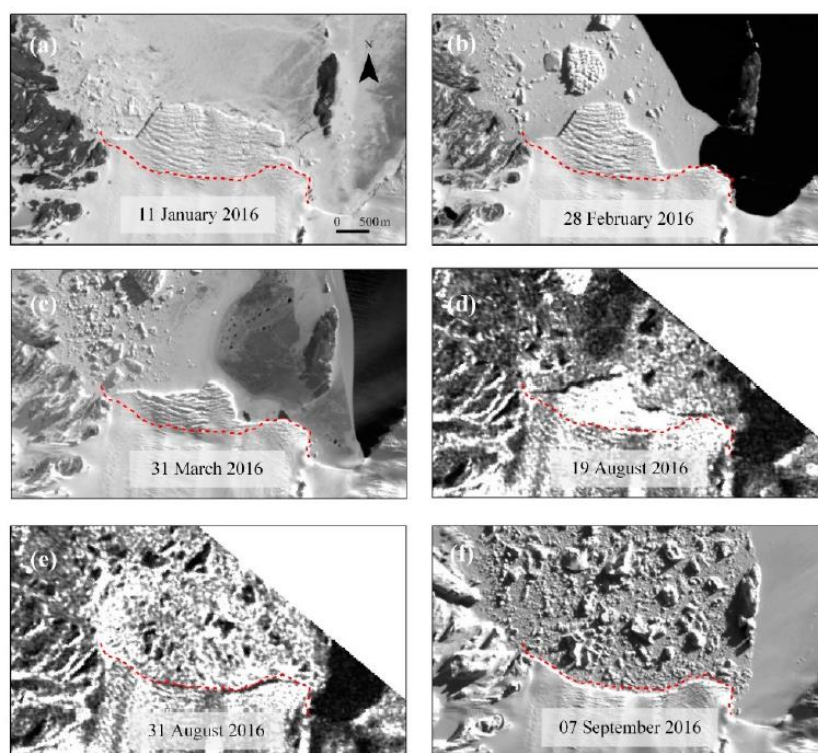


Рисунок 4. Снимки Landsat 8 и Sentinel-1, на которых показана эволюция крупнейшего отела на леднике Долк в 2016 году. Красная пунктирная линия показывает конечную позицию на 22 января 2017 года (Chen, 2020).

На рисунке демонстрируется форма ледника Долк на настоящий момент, красная пунктирная линия показывает конечную позицию ледниковой поверхности на 22 января 2017 года.

Глава 2. Особенности дешифрирования ледников и ледниковых поверхностей

2.1. Классификация ледников и их характеристика

Ледником называется толща природного наземного льда зачастую атмосферного происхождения, которая имеет способность осуществлять физическое движение за счет деформации под действием силы тяжести. Главным образом ледники образуются из выпадающего снега, но также могут включать в себя части водного льда, примером являются шельфовые ледники (Долгушин, Осипова, 1989).

Существуют две главные группы ледников:

- горные, форма и движение которых определяются уклоном занимаемого ими ложа и характером рельефа;
- покровные, ледяная толща которых скрывает неровности подледного рельефа, а движение масс льда определяется уклоном поверхности самого ледника.

Существуют также переходные типы от одной из этих групп к другой.

В соответствии со схемой (рисунок 5) все ледники делятся на покровные, горно-покровные и горные. Основные типы подразделяются на группы второго и третьего порядков. В рамках данной работы будут рассмотрены два главных типа ледников – горные и покровные (Долгушин, Осипова, 1989).

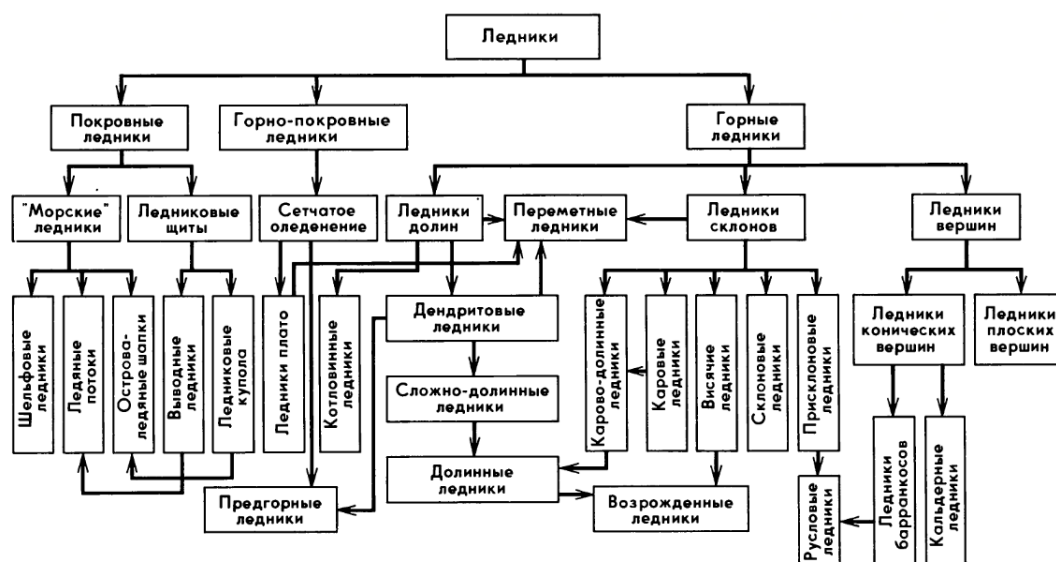


Рисунок 5. Морфологические типы ледников, схема (Долгушин, Осипова, 1989)

Покровные ледники застилают значительную часть территории независимо от рельефа, на котором находятся. Выход к воде покровных ледников осуществляется за

счет «языков», от которых регулярно откалываются айсберги разных размеров. К крупнейшим покровным оледенениям причисляются Антарктический и Гренландский ледниковые щиты (www.mollys-bugs.com).

Характерное для покровного оледенения расползание льда от центра к периферии объясняется особенностями питания, расходом и пластическими свойствами ледяных масс. Кроме того, в значительной степени на направление движения ледниковой поверхности покровных ледников влияет тектонического строения ледниковых куполов (Тушинский, 1963).

К видам покровного оледенения относятся шельфовые ледники - плавучие или частично опирающиеся на дно толщи льда, протекающие в направлении моря в виде утончающейся к краю плиты и заканчивающиеся обрывистым фронтом. Питаются шельфовые ледники в основном выпадающих атмосферных осадков и спускающихся с ледникового покрова ледяных потоков и выводных ледников. Скорости движения поверхности увеличиваются от центра к краям, где могут достигать 1500-2000 м в год (Долгушин, Осипова, 1989). В настоящее время наиболее распространены в Антарктиде, занимая около 1,5 млн км² площади материка (www.intaari.ru).

Выводные ледники также относятся к покровному оледенению и представляют собой потоки льда, осуществляющие функцию осушения (дренирования) бассейна континентального ледникового покрова. Обычно они приурочены к подледным долинам, ориентированным в направлении общего движения льда. Скорость движения льда на самих ледниках может достигать нескольких километров в год. Выводные ледники в большей степени типичны для окраин ледниковых покровов, но иногда верховьями могут уходить вглубь материка на десятки и даже сотни километров. Именно выводные ледники образуют плавучие ледниковые языки и продуцируют многочисленные айсберги.

В нижнем течении выводных ледников тенденция движения прослеживается визуально, признаком быстрого движения льда в ледяных потоках является возрастание трещиноватости поверхности. На некоторых участках густая сеть трещин становится непроходимой, физически воспрещая деятельность любого вида механизированного транспорта (Долгушин, Осипова, 1989).

Часть покровного оледенения составляют ледниковые купола, форма которых схожа с формой ледникового щита, но более выпукла из-за меньшей площади. Ледниковые купола иногда могут полностью покрывать отдельные острова в Арктике и Антарктике, а иногда и образовываться среди шельфовых ледников в местах их прилегания к подстилающему грунту.

Горные ледники известны как скопления природных атмосферных льдов в областях расчлененного рельефа большинства горных стран (Окишев П. А.). Ввиду своей приуроченности к скальному рельефу форма горных ледников напрямую зависит от особенностей земной поверхности, а сток льда происходит по направлениям тальвегов долин (Тушинский, 1963).

На участках крутого перепада высоты поверхности в продольном профиле ледника сплошность ледниковой массы разбивается глубокими поперечными трещинами и поверхность приобретает вид беспорядочного нагромождения ледяных глыб, пластин, блоков. Эти участки глыбового или блокового движения льда известны как ледопады. Тело ледника иногда настолько раздроблено, что становится труднопроходимым даже для спортсменов со специальным снаряжением (Окишев, 2017).

Среди классификаций горных ледников по морфологическим признакам выделяют иерархическую, в которой основные типы ледников перечисляются как система соподчинённых понятий (Окишев, 2017). Если говорить об общей классификации, то в ней выделяют три типа горных ледников: ледники долин, ледники склонов и ледники вершин.

Для ледников долин (альпийский тип) характерна четкая морфологическая обособленность фирнового бассейна и абляции. Из вогнутой области питания в долину спускается один ледниковый язык, зачастую имеющий выпуклый поперечный профиль. Чем сложнее долинный ледник, тем из большего количества ледниковых потоков с самостоятельными областями питания он состоит. Существуют древовидные (дендритовые) ледники, притоки которого имеют сложные ветвистые очертания, а именно свои притоки с самостоятельными областями питания.

Ледники склонов полностью или частично располагаются в чашеобразных углублениях на горных склонах, многие из них существуют благодаря накоплению в каррах лавинного снега, из-за чего могут располагаться значительно ниже климатической снеговой границы. Расход льда осуществляется происходит путем ледяных обвалов. Если обвалы происходят часто, у подножия может образоваться возрожденный ледник.

Возвышающиеся над окружающей местностью вершины конической формы покрываются ледниками вершин. На вершинах правильной формы со слаборасчлененными склонами ледники вершин по краям имеют ровную или фестончатую (гирляндовую) границу. В случае сильного расчленения склонов оврагами и долинами по ним спускаются языки выводных ледников, питающиеся из вершинного снежно-фирнового покрова.

Перечисленные типы не исчерпывают многообразия форм, условий залегания и размеров ледников. Среди них могут быть как упомянутые переходные формы, так и комплексные объединения и даже системы, которые встречаются при рассмотрении оледенения конкретных районов (Долгушин, Осипова, 1989).

2.2. Особенности рельефа ледниковых поверхностей

2.2.1. Формы рельефа поверхности ледников

В основном ледники сложены льдом осадочно-метаморфического происхождения, образовавшимся из твердых атмосферных осадков в результате уплотнения и перекристаллизации. Вследствие этого характерная особенность ледникового льда - зернистость и «полосчатость» (Долгушин, Осипова, 1989).

Поверхность большинства ледников в области абляции разбита системой трещин разных размеров и глубины. Главным образом трещины появляются на участках относительно быстрого движения ледника, когда напряжения в нем достигают предельных значений. Визуально это протяженные линейные формы рельефа, расположенные ортогонально линии течения, открытые либо перекрытые снежными мостами разной толщины. На аэрофотоснимках и ортофотопланах такие трещины выявляются в виде протяжённых линейных отрицательных форм рельефа.

Возникновение трещин объясняется также неровностями подледного рельефа, о чем свидетельствует тот факт, что образование трещин имеет локализованный поверхностный характер. Они образуются все время на одних и тех же местах ледника, при этом в процессе деформации участвуют каждый раз новые массы льда, а старые трещины постепенно исчезают при дальнейшем перемещении толщи ледника (Окишев, 2017).

Размеры трещин могут варьироваться в широких пределах как по ширине, так и по протяженности. Наиболее крупные характерны для ледопадов и концевых участков ледниковых языков. Глубина таких трещин может достигать 20–30 м, на массивных перегибах отмечены и более глубокие (до 50 м). Участки густой трещиноватости характеризуются глубиной трещин в несколько десятков дециметров и редко доходит до метра (Окишев, 2017).

По конфигурации различают трещины:

- диагональные по отношению к продольному профилю ледникового языка трещины (боковые);

- поперечные трещины (иногда пересекающие язык во всю его ширину);
- продольные прямолинейные;
- продольные веерообразные;
- волнистые (рисунок 6);
- сетчатые.



Рисунок 6. Волнистые продольные трещины (Окишев, 2017).

На поверхности ледниковых языков встречаются конусовидные скопления моренного материала высотой до 1-1,5 м, реже более высокие. Под моренным материалом обнаруживаются «ледяные пирамидки», по своим формам и размерам напоминающие муравейники. Из отрицательных микроформ рельефа также можно отметить ледниковые блюдца и ледниковые стаканы, которые образуются в летний период на освободившейся от сезонного снега и подвергнутой таянию ледниковой поверхности. На отдельных ледниках массовое развитие таких образований существенно усложняет поверхность языков.

В целом на ледниках встречаются различного вида продольные поверхностные структуры (также известные как полосы потока, линии потока, линии полос или слоение) - длинные линейные всепроникающие слоистые структуры, параллельные движению льда. Часто образуются в областях положительного рельефа, на выступах ложа или в областях повышенного базального трения. Встречаются также поперечные (дугообразные) структуры - прямые темные линии в местах образования трещин. Их можно проследить вниз по леднику в виде деформирующих темных линий, часто превращающихся в дугообразные структуры и пересекающие ранее сформированные. Складки и складчатые структуры – еще один вид крупномасштабных складчатостей,

который проявляется в виде изгибов или кривых в других линейных объектах, не соответствующих рельефу поверхности (Neil, 2008).

Для рельефа ледниковых поверхностей также свойственны такие формы, как заструги (острые, неправильной формы гряды уплотненного снега, образовавшиеся в результате выдувания и переноса снега ветром), торосы (любое отдельное нагромождение льда, образовавшееся в результате сжатия), гряды торосов (сравнительно прямолинейное нагромождение битого льда, образовавшееся в результате сжатия), ледяные холмы (монолитные возвышения на поверхности льда, образовавшееся в результате многолетнего сглаживания тороса) и другие (Бушуев, 1974).

2.2.2. Условные знаки для изображения рельефа ледников

Технические документы подразумевает под собой руководства, документы по управлению территорией, ГОСТы и прочие материалы, которые будут способствовать грамотному решению поставленных практических задач. В картографии одними из главных документов являются геодезические, картографические инструкции, нормы и правила (ГКИНП), которые приводят условные знаки, условные сокращения надписей, образцы шрифтов и зарамочного оформления. Такие документы являются обязательными к применению для всех предприятий, организаций и учреждений, которые выполняют топографо-геодезические работы независимо от их ведомственной принадлежности.

Наиболее четким образом требования к условным знакам установлены для топографических карт и планов различного масштаба, так как условные обозначения при данном виде картографических работ должны быть единообразными с целью обеспечения упорядоченности и универсальности топографических изображений даже спустя большое количество времени.

В ГКИНП «Условные знаки для топографических и общегеографических карт Антарктики» (Условные знаки..., 1989) помимо указаний к содержанию и представлению на картах математических элементов и пунктов плановой и высотной основы карт, научных станций и объектов, связанных с деятельностью человека в Антарктиде, объектов, связанных с транспортными коммуникациями и гидрографических объектов приводится раздел с условными обозначениями для рельефа суши, в который помимо территорий, свободных ото льда, входят ледниковые поверхности (рисунок 7).

4.2.10.	Зоны (поля) ледниковых трещин. В пределах контура условные знаки расставляются таким образом, чтобы передать господствующее направление трещин и их густоту.
4.2.11.	Разломы на ледниках.
4.2.12.	Ледяные обрывы и уступы. 20 — высота в метрах.
4.2.13.	Ледяные пещеры, гроты.
4.2.14.	Линии направления движения

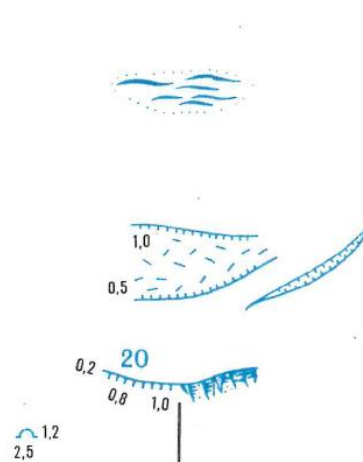


Рисунок 7. Фрагмент таблицы условных знаков ледниковых поверхностей (Условные знаки..., 1989)

Условные знаки оформлены в виде таблиц и сопровождаются рекомендуемыми размерами в миллиметрах. Для каждого масштаба обозначения указаны отдельно, как для топографических, так и для общегеографических карт. Среди изображаемых явлений и форм рельефа требования к условным обозначениям указаны для горизонталей (основные утолщенные, основные, дополнительные, вспомогательные), указателей направления скатов на горизонталях, депрессий на поверхности льда, которые горизонталями не выражаются, ледниковых трещин, зон (полей) ледниковых трещин, нунатак, разломов на ледниках, ледяных уступов и обрывов, ледяных гротов, линий направления движения ледника, ледяных валов, ледяных холмов, депрессий с талой водой и снегом, заструг, снежных уступов, снежных и надувов. Также указаны условные знаки для мест образования и скопления айсбергов, плавающих ледниковых языков, берегов ледяных обрывистых и береговых линий (постоянной и непостоянной). Условные знаки в основном представлены линейными и точечными объектами с установленным цветом, размерами знака и подписями.

Кроме технических документов, имеет место быть авторский подход к изображению ледников и их рельефа на картах. В книге профессора Г. К. Тушинского «Ледники, снежники и лавины Советского Союза» (Тушинский, 1963) уделяется большое значение местным условиям образования и существования ледников и анализу динамики их вековых изменений. Используя личные материалы и данные других исследователей, ученый рассказывает о географии ледников СССР и о практическом и теоретическом значении их исследования. Тушинский приводит правила рекогносцировочных обследований ледников и как образец вкладывает гляцио-

геоморфологическую схему, составленную по легенде, разработанной Костоусовым, Кравцовой, Патык-Кара и самим Тушинским (рисунок 8).

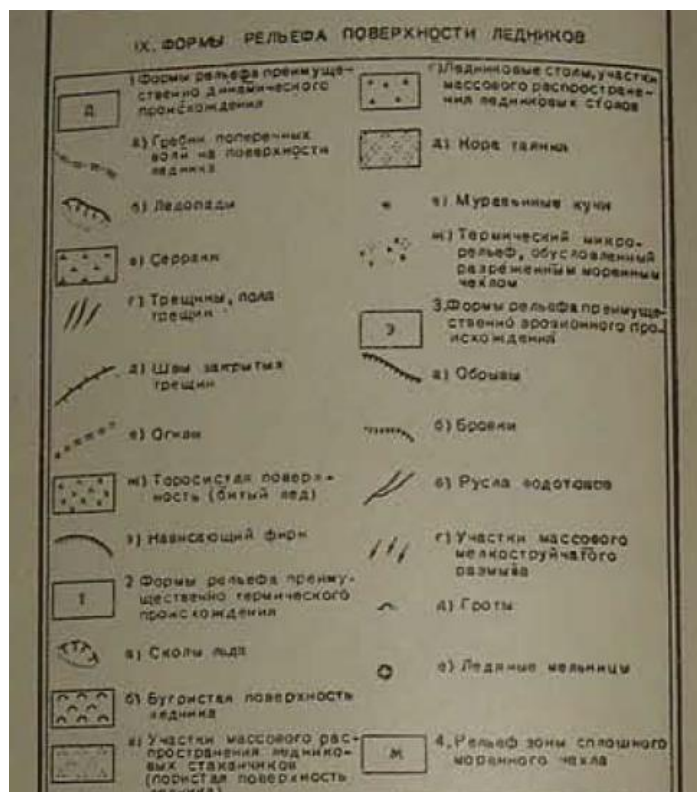


Рисунок 8. Фрагмент легенды гляциоморфологической карты Эльбруса, на котором изображены топографические способы отображения форм рельефа поверхности ледников (Тушинский, 1963)

Авторский подход применяется активно и в современном цифровом картографировании. Основные и уже устоявшиеся способы изображения ледникового рельефа, а также самих ледников, остаются практически неизменными. Расхождения возникают при попытках отобразить явления, для которых в программных продуктах не предусмотрены алгоритмы реализации (например, постепенное утолщение линии трещин).

2.3. Особенности дешифрирования и картографирования ледников и ледниковых поверхностей

Ледники обладают сложным и в какой-то степени уникальным рельефом. Часто при проведении различных исследований, осуществлении геологических и картографических работ поверхность ледника оказывается труднодоступной для

полевого наблюдения ввиду своей сложной структуры либо большого удаления от проходимой части местности, на территории которой ледник расположен. Вследствие этого дешифрирование ледниковой поверхности производят в ручном режиме по данным различных съемок, специально запланированных или регулярно осуществляемых.

Вопрос интерпретации рельефа на снимках имеет огромное значение, так как для грамотного дешифрирования и определения природы форм поверхности, их структуры и подбора необходимых условных обозначений необходимо обладать знаниями процесса съемки, данными о времени года и суток, «насмотренностью» в области ледникового рельефа и вариаций его морфоскульптурного существования.

Несмотря на то, что информация о морфологическом разнообразии рельефа ледников и профессиональное использование ее в целях дешифрирования поверхности имеет большое значение, окончательная интерпретация ледникового ландшафта в целом редко осуществляется исключительно на основе морфологии поверхности. При возможности исследований на местности дополнительные полевые данные способствуют достоверности будущей интерпретации и являются релевантными в зависимости от целей отдельных изысканий и картографических произведений (Chandler, 2018).

Погодные и временные условия съемки, как уже было упомянуто, имеют одно из ключевых значений при осуществлении дешифрирования ледниковой поверхности. Так, при пологом падении солнечных лучей на поверхность ледника будет наблюдаться некий эффект «подсветки» трещин, разломов и других продольных отрицательных форм рельефа, из-за преломления попадающего на границу этих объектов света. Кроме того, на корректную идентификацию форм в значительной степени влияет запорошенность снегом, так как он маскирует микрорельеф, выравнивая одни объекты и деформируя другие. Этот фактор увеличивает вероятность допущения ошибок при дешифрировании и потенциального пропуска таких трещин (Пряхин, 2015).

Качество и внимательность ручного дешифрирования поверхности по снимкам является большим преимуществом этого метода. Но для огромных объемов информации и большого охвата территорий данный процесс может занять огромное количество времени. Встает вопрос об автоматизации дешифрирования ледниковых поверхностей.

Автоматическое дешифрирование ледников в настоящее время широко распространено в исследованиях, посвященных уточнению форм ледниковых образований, мониторингу их скорости движения, деформации, откола айсбергов и др. (Wheate, 2015).

Одним из объектов ледников, дешифрирование которого поддается автоматизации, является фронт отела - форма абляции льда, в рамках которой происходит откалывание айсбергов. В отличие от прочих показателей динамического поведения ледника (например, толщины или линии заземления), фронт отела может быть непосредственно определен на спутниковых снимках, что открывает возможность для автоматического мониторинга подавляющего числа ледников при наличии спутниковых данных.

Подход к автоматическому очерчиванию этого фронта заключается в осторожном обнаружении краев в совокупности с задачами оптимизации кратчайшего пути для поиска местоположения фронта отела на изображениях обратного рассеяния SAR от Sentinel-1 и TerraSARX. Метод применим даже в сильно деформированных условиях с толстым ледяным меланжем и большим количеством айсбергов перед самим ледником. Определение фронта выполняется на калиброванных и геокодированных изображениях обратного рассеяния амплитуды SAR в поляризации HH. Чтобы автоматически очертить фронт отела, используется проверенный алгоритм обнаружения краев на изображениях SAR (Krieger, 2015).

Изображения SAR также активно используются для изучения характеристик поверхностных структур на шельфовых ледниках и ледниковых языках (Wesche, 2013). Эти структуры распознаются на изображениях SAR как быстрые изменения коэффициента обратного рассеяния на небольшом расстоянии. У метода есть свои недостатки, поскольку на идентификацию структур значительно влияет размер пикселя и наличие шума (спекла). Результатом автоматизации процесса дешифрирования поверхности ледников являются сопоставительные изображения с нанесенными алгоритмом и эталонными, определенными вручную, объектами (рисунок 9).

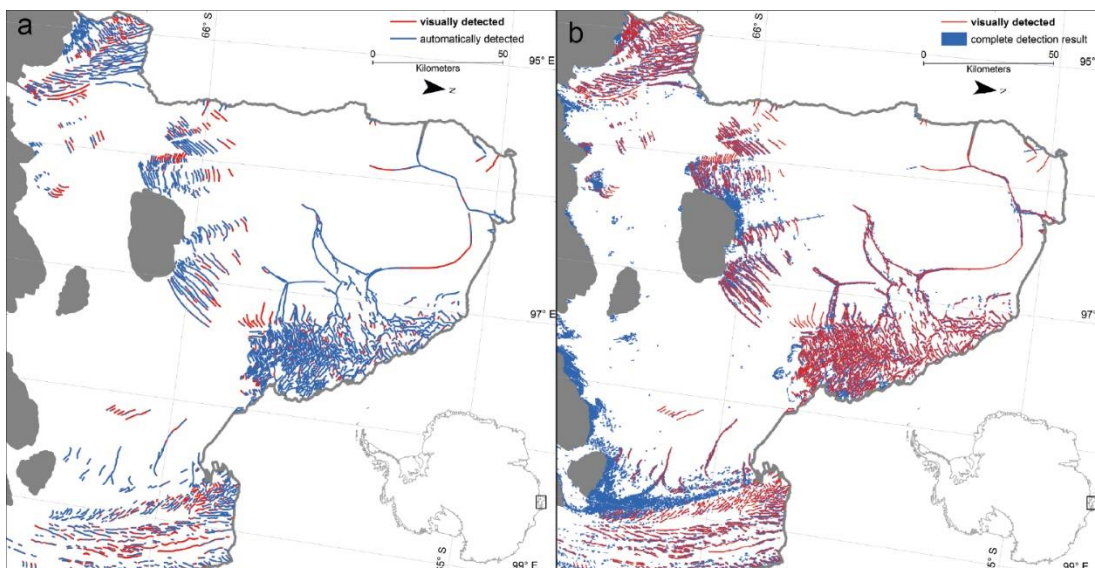


Рисунок 9. Результаты автоматизированного распознавания структур рельефа ледниковой поверхности северной части шельфового ледника Шеклтона (а - автоматически обнаруженные объекты, соответствующие визуальным обнаруженным объектам; б - все автоматически идентифицированные структуры, включая ложные результаты обнаружения. Синие линии показывают соответствие действительности, красные указывают на ошибки) (Wesche, 2013)

С помощью таких технологий автоматическому дешифрированию подлежат только структуры, ширина на местности которых хотя бы равна размеру пикселя либо сами объекты интенсивно контрастируют с соседними ненарушенными областями поверхности (Wesche, 2013).

Существуют также полуавтоматические технологии дешифрирования ледниковых объектов, например, ледяных скал, которые имеют огромное значение в балансе массы ледников, покрытых мусором, но оценка важности которых ограничена отсутствием наборов данных об их распределении. Для таких случаев разрабатываются объективные подходы для обеспечения точного дешифрирования скал и прудов по многоспектральным изображениям в пределах одного либо нескольких ледников (Kneib, 2020).

Изображение ледников и ледниковых поверхностей наносится как на топографические и общегеографические, так и на тематические карты. Чаще всего ими сопровождают исследования в области гляциологии и нередко такие картографические изображения носят схематический характер, отражая сущность явления и делая акцент на визуализации результатов изыскания.

Большинство общегеографических карт приурочено к крупным изданиям, таким как атласы, и создаются на территории со значительным оледенением (рисунок 10). При составлении таких карт специалисты пользуются общепринятыми обозначениями, часть из которых может претерпевать изменения в зависимости от издателя и года издания.

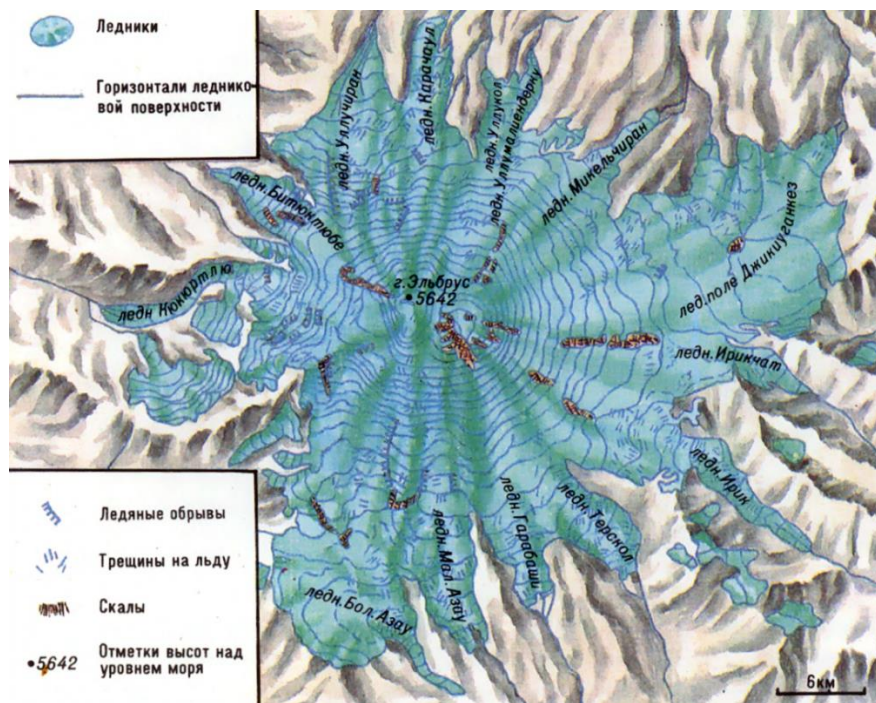


Рисунок 10. Карта ледникового комплекса Эльбруса (Долгушин, Осипова, 1989)

Картографирование ледников и ледниковых поверхностей в большей степени составляется в средних и мелких масштабах и закладывает в себя задачи общего представления территории с прилегающей местностью, исполняя требования генерализации, но сохраняя детальность очертания границ ледника и информации о его поверхностной структуре в виде изолиний и точек высот. В некоторых случаях карты дополняются условными обозначениями крупных трещин, разломов, депрессий и других форм рельефа, необходимых для нанесения в рамках заданного масштаба.

При создании карт на ледниковые территории немаловажным, а иногда и обязательным условием является проверка точности и сравнение с результатами картографирования объекта других исследований. В первую очередь это продиктовано динамичностью ледников, их движением, деформированием и регулярным отколом частей в виде айсбергов. Зачастую сравнение с предшествующими достоверными картографическими работами не только помогает установить точность представления картографируемой территории ледниковой поверхности, но и, возможно, выявить

закономерности тех или иных гляциологических процессов, происходящих на леднике (например, тенденцию изменения его границ).

В связи с повышенным вниманием к территориям, покрытым льдом, актуальным является вопрос их детального топографического картографирования с использованием новейших технологий сбора данных с помощью БПЛА (БВС) и получения массива высотных данных и точных цифровых моделей рельефа (Fugazza, 2015; Ute, 2004). В частности, проводится активное составление крупномасштабных топографических карт на антарктические острова, полуострова и оазисы, на территориях которых находятся станции различных стран.

В качестве примера можно привести крупномасштабную карту на полуостров Келлер (рисунок 11), расположенный в Адмиралтейском заливе, где находится бразильская Антарктическая станция Команданте Феррас (Mendes, 2012).

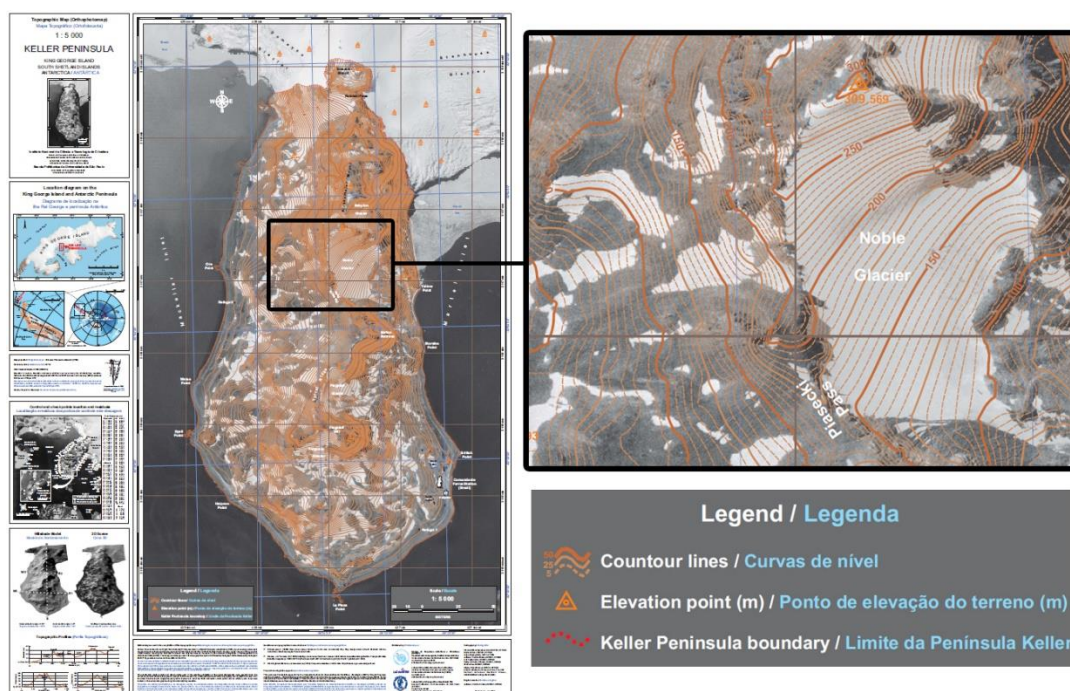


Рисунок 11. Топографическая карта полуострова Келлер в масштабе 1:5000 с увеличенным фрагментом и легендой (Mendes, 2012)

Область полуострова была нанесена на карту в масштабе 1:5000 с использованием фотограмметрических и ГИС-методов и базировалась на внутренней и внешней ориентации аэрофотоснимков, создании ЦМР, автоматическом извлечении из нее изолиний и дальнейшей оценке точности результатов (Mendes, 2012).

Глава 3. Дешифрирование ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по данным съемки БПЛА

3.1. Данные съемки БПЛА и ортофотоплан на территорию оазиса Холмы Ларсеманн

3.1.1. Данные съемки БПЛА оазиса Холмы Ларсеманн

В январе 2017 года была проведена аэрофотосъемка полуострова Брокнес на территории антарктического оазиса Холмы Ларсеманн, находящегося на берегу залива Прюдс, который относится к акватории моря Содружества.

С помощью фотограмметрического, геодезического и картографического программного обеспечения, позволяющего обрабатывать данные с высокой точностью и представлять в виде цифровых картографических материалов, а также возможностей БПЛА становится осуществимой задача составления топографических карт и планов крупного масштаба на территорию Антарктиды.

В результате съемки были получены снимки высокого разрешения, которые целесообразно задействовать в создании цифровой модели местности и ортофотопланов, послужащих в дальнейшем базой для создания топографической основы на запечатленную территорию (рисунок 12).

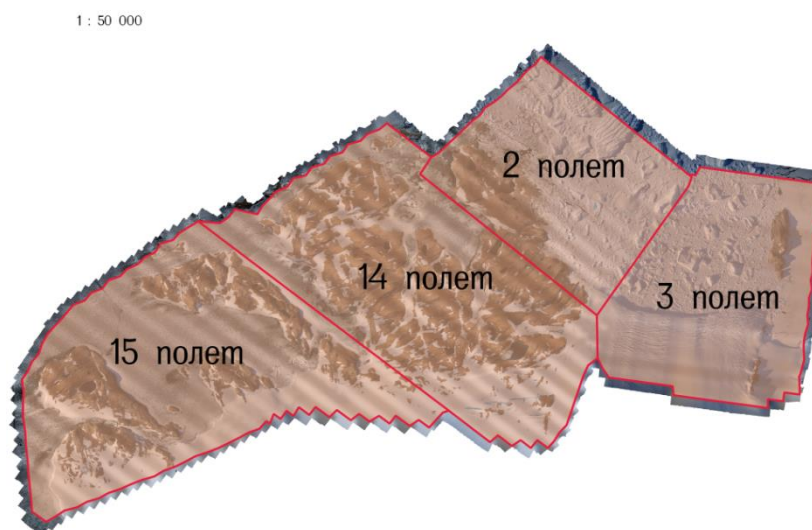


Рисунок 12. Территория аэрофотосъемки оазиса Холмы Ларсеманн

В качестве исходных материалов для основы были взяты данные по четырем полетам (2, 3, 14, 15), которые были совершены в два дня:

- второй и третий полеты были проведены 14 января;
- четырнадцатый и пятнадцатый полеты были проведены 20 января.

Маршрут второго полета проходил по акватории залива, островам и северо-восточной окраине полуострова Брокнес, на которой расположены китайская научная станция Зонгсан и научно-исследовательская станция Прогресс II. Третий полет затронул часть ледника Долк и близлежащий остров Далкой. Территория съемки четырнадцатого полета охватила большую часть полуострова Брокнес с такими крупными озерами, как Прогресс и Скандретт, и станциями Прогресс I и Лоу, пятнадцатого – крупный остров Фишер.

Общая площадь съемки составила 63 км² (5440 полученных снимков).

Первоначально предварительные данные полетов были приведены к ортометрической системе высот. В программном обеспечении Magnet Office Tools были заново пересчитаны высоты точек, вычислены средние квадратические ошибки и получены данные, экспортированные в текстовый файл для дальнейшей фотограмметрической обработки.

Дальнейшее преобразование результатов съемки произвели в цифровой фотограмметрической системе (ЦФС) Agisoft Metashape на предприятии ГК «Геоскан» (www.geoscan.aero). Главным преимуществом системы является возможность осуществления относительно быстрой и автоматической обработки множества снимков. Была проведена фотограмметрическая обработка, в рамках которой происходило выравнивание снимков, построение плотного облака точек, построение цифровой модели местности и ортофотоплана.

В результате обработки данных были получены цифровые модели местности с пространственным разрешением 50 см и ортофотопланы с размером пикселя, равным 6*6 см на местности. Этот набор данных позволил начать работы по составлению топографической основы на территорию съемки, в том числе и на ледниковую часть оазиса Холмы Ларсеманн, запечатленную во время второго полета 14 января.

3.1.2. Автоматизированное построение рельефа

Горизонтالي – главный элемент, изображающий рельеф поверхности на картах. С развитием программного обеспечения и методов получения данных о поверхности Земли стало возможным визуализировать рельеф в автоматическом режиме с помощью специальных инструментов, задействуя данные, имеющие массивы со значениями высот. Для территории оазиса Холмы Ларсеманн такими данными стала съемка, осуществленная с помощью БПЛА в январе 2017 года.

Перед тем, как строить изолинии на исследуемую территорию, требовалось создание береговой линии оазиса Холмы Ларсеманн, включающей в себя также и ледниковую поверхность ледника Долк, с использованием ранее полученных ортофотопланов. Итогом данного этапа работ стал полигональный векторный слой суши оазиса и ледниковой поверхности ледника, который в дальнейшем использовался в качестве ограничения площади интерполяции изолиний рельефа по цифровой модели местности, позволяя исключить влияние значений высот на воде и на других «лишних» участках.

Векторный слой, полученный в результате оцифровки территории оазиса и ледниковой поверхности по береговой линии, с помощью операции «Обрезать растр по маске» отделил необходимые растры, содержащие информацию об ортометрических высотах, с пространственным разрешением 50 сантиметров.

С помощью имеющихся данных в дальнейшем производилась интерполяция горизонталей с предварительно выбранной высотой сечения рельефа. Чтобы корректно определить оптимальный для территории шаг изолиний, был проведен анализ углов наклона картографируемой местности. На основе проведенного анализа решено выбрать значение высоты сечения рельефа равное 2 метрам, что соответствует горному и предгорному рельефа с углами наклона более 6° (Основные положения..., 1970).

Воспользовавшись инструментом «Создать изолинии» были получены построенные изолинии инженерного качества, представляющие точную интерпретацию модели растровой поверхности с шагом 2 м. После этого операцию по построению горизонталей повторили для генерации изолиний с шагом в 1 метр, созданный слой которых будет использован при необходимости введения для изображения рельефа поверхности дополнительных горизонталей.

Данный векторный слой с интерполированными горизонталями является «сырым» вариантом изображения рельефа поверхности и нуждается в дополнительной обработке, которая будет произведена на дальнейших этапах работы.

3.2. Редактирование горизонталей, построенных автоматизированным методом

Точность изолиний в совокупности зависит от качества данных, представляющих реальную или абстрактную поверхность и использованных для создания входного растра. Размер ячеек растра напрямую влияет на то, как будут выглядеть горизонтали на выходе. В случае применения ячеек большого размера изолинии с большой вероятностью будут грубыми и уступчатыми.

Построение изолиний в автоматическом режиме не лишено недостатков. Главным образом на это влияют данные, по которым интерполируется поверхность и создается слой горизонталей с заданным шагом и дополнительно установленными условиями (базовой линией и т.д.). Но есть различные аспекты автоматизации процесса построения изолиний, которые являются производными самого алгоритма или других технических моментов.

Автоматически построенным горизонталям свойственны пересечения либо очень близкое расположение по отношению к друг другу, что может выглядеть как пересечение, не исключено формирование незамкнутых ответвлений. Пересекающиеся изолинии встречаются в углублениях и впадинах, которые в точности попадают в заданный интервал построенных изолиний. Горизонтالي также могут проходить очень близко друг к другу, визуально демонстрируя пересечение, которого на самом деле нет.

Полученные изолинии моделируются исключительно математически, при этом не учитываются объекты поверхности, такие как антропогенные постройки, искусственные неровности и временные насыпи, в результате чего появляется «шум» и горизонтали выглядят «дрожащими» (рисунок 13).

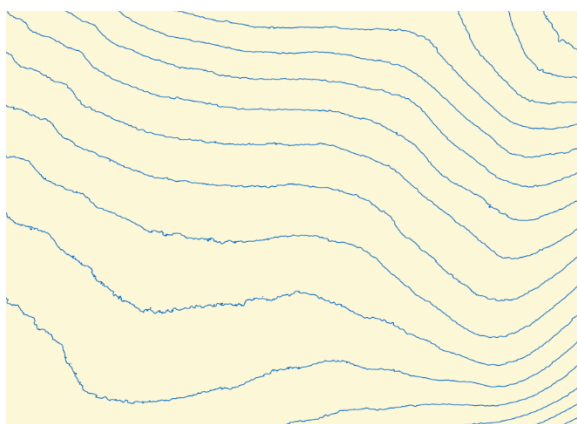


Рисунок 13. Первичный вид слоя изолиний

Программные продукты, в том числе и QGIS, предлагают различные способы генерализации как растровых, так и векторных данных. К слою изолиний применительны такие инструменты как «Simplify» и «Сглаживание», которые сохраняют общий тренд горизонталей, удалив при этом избыточные узлы линий и частично уменьшив «колебания». В результате применения алгоритма выходной слой изолиний выглядит заметно лучше, но все еще далек от привычного, грамотного вида, который будет достигаться путем ручного редактирования (рисунок 14). Выявление проблем

автоматизированного построения горизонталей происходит как на предварительных этапах создания слоя изолиний, так и в процессе их ручного редактирования.

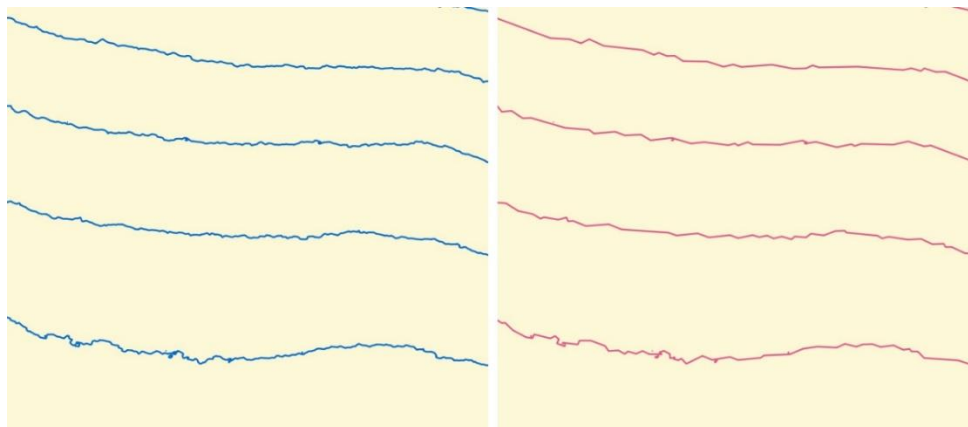


Рисунок 14. Обработанный с помощью инструментов генерализации слой изолиний

Помимо очевидной цели привести векторный слой изолиний в корректный вид, задача состоит главным образом в том, чтобы грамотно определить горизонтали, построенные «правильно», а именно не идущие по, очевидно, неподходящим для этого участкам. Особенно актуальной эта проблема является для территории ледниковой поверхности, где алгоритм проводит линии по формам рельефа, которые не должны им игнорироваться и быть отражены в общем ходе горизонтали (рисунок 15).



Рисунок 15. Пример изолинии, проведенной в «неподходящем» месте

Еще один недостаток автоматизированного построения горизонталей состоит в слишком детальной визуализации цифровых высотных данных. Особенность проявляется на участках местности, где алгоритм визуализирует избыточное количество пикселей как отдельные изолинии, зачастую даже не выражающиеся в масштабе карты. И если в случае поверхности оазиса это могут быть, например, каменистые россыпи, то на леднике такие ситуации могут быть вызваны рыхлым рельефом, перепад высот в рамках которого минимален. Генерация «лишних» горизонталей свойственна всем типам территорий, но на некоторых участках она проявляется очень обильно.

Помимо уже обозначенных проблем автоматического построения горизонталей следует заострить внимание на менее серьезных, но ощутимых недостатках, которые были отмечены при ручном редактировании территории ледника Долк (рисунок 16).

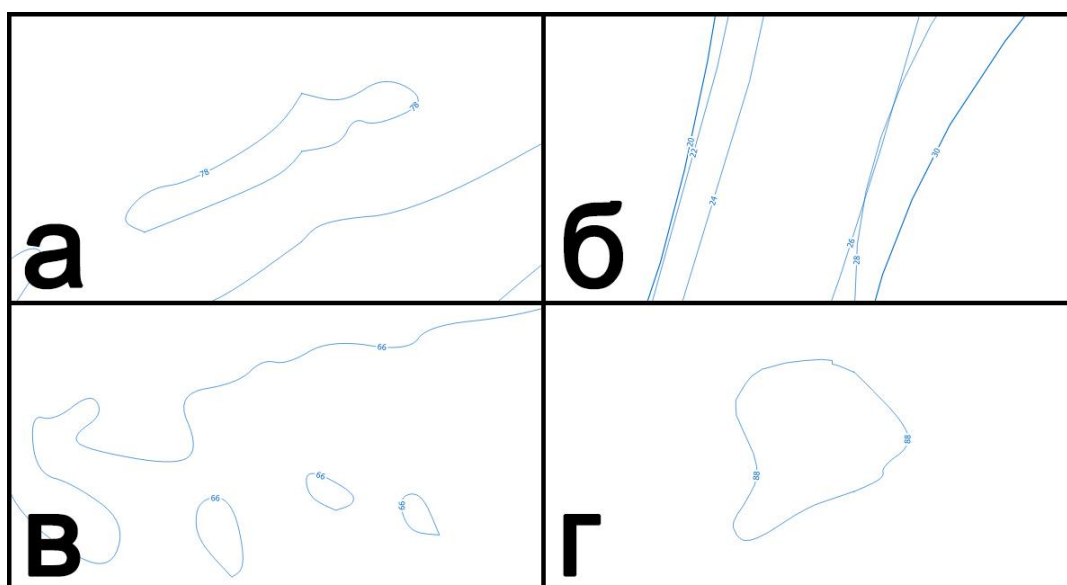


Рисунок 16. Недостатки автоматического построения горизонталей (а – «угловатость» горизонталей, б – пересечение и «запутывание» горизонталей, в – скопление горизонталей одинаковых значений высот, г – «рваное» изображение горизонталей)

Среди них было выявлено образование мелких и мельчайших линейных объектов, «рваное» изображение замкнутых горизонталей, несвойственная изолиниям «угловатость», их «запутывание» и даже пересечение в местах резкого увеличения крутизны поверхности, скопление расположенных рядом замкнутых горизонталей одинаковых значений.

3.3. Дешифрирование части ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по данным съемки БПЛА

3.3.1. Особенности дешифрирования ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн

Помимо уже обозначенных проблем, связанных с несовершенством автоматического построения горизонталей, есть гораздо более значимые проблемы, возникающие как при интерпретации автоматически построенных изолиний на ледниковую поверхность, так и при идентификации рельефа ледника для корректного его отображения на карте.

Особенность ледниковой поверхности заключается в движении самого ледника и следующей из этого деформации. В результате рельеф представлен огромным количеством «рваных» структур: трещинами, впадинами и даже разломами. Некоторые участки демонстрируют особо сильно расчлененный рельеф, сложный не только для интерпретации, но и для понимания и идентификации самих форм и объектов.

Главным образом проблемы возникают именно в местах, наиболее деформированных и «разорванных» движением ледника (рисунок 17).



Рисунок 17. Наиболее проблемные для дешифрирования участки ледниковой поверхности

Традиционно дешифрирование ледниковой поверхности на топографических картах проводится в масштабе от 1:5000 и мельче. В соответствии с этим для изображения рельефа применяются условные знаки, обозначающие лишь массивные

расколы и деформации, зоны ледниковых трещин, различные депрессии и другие элементы рельефа с ощутимым масштабом. В случае некоторых топографических карт ледниковую поверхность отображают отдельным площадным условным знаком и дешифрируют как цельную поверхность, дополняя ее горизонталями, показывающими общий тренд и изменение высоты.

Получение на ледниковую поверхность детальных ортофотопланов и постановка задачи создания крупномасштабной топографической основы на отснятую территорию открывает новые возможности в изучении самой поверхности, ее детального дешифрирования и картографирования. Но вместе с этим встает вопрос об условных обозначениях, которыми следует оперировать при крупномасштабном дешифрировании ортофотопланов доступной детализации.

Исходя из вышесказанного, можно выделить две главные проблемы дешифрирования ледниковой части оазиса Холмы Ларсеманн:

- трудности интерпретации отдельных участков и форм поверхности ледника с целью подобрать для них оптимальный способ изображения на топографическом плане;
- трудности подбора условных обозначений и их адаптация для выбранного программного продукта, в котором будет происходить дешифрирование.

Горизонтали, построенные на поверхность ледника на ранних этапах работы, как уже было сказано, должны корректно изображать ледниковый рельеф. Несмотря на все недостатки автоматического метода создания изолиний, выходной векторный слой в целом удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям точности представления рельефа ледниковой поверхности оазиса. По изолиниям можно проследить общее изменение высот, выявить закономерности усиления раздробленности поверхности, наиболее подверженные деформации участки, объекты с выраженной структурой и наиболее ровную часть ледника.

3.3.2. Разработка топографической основы на часть ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн

Главным образом подготовка части топографической основы на территорию оазиса заключалась в ручном редактировании линейного слоя горизонталей.

Одной из проблем автоматического построения изолиний является генерация очень мелких линейных объектов, которые зачастую создаются ошибочно и не нужны для представления рельефа. В связи с этим перед началом редактирования следовало

исключить горизонтали, не выражающиеся в масштабе плана. Под ценз для плана масштаба 1:2000 см попали линейные объекты, значение длины на местности которых равняется 10 м.

При работе с атрибутивной таблицей слоя горизонталей с помощью калькулятора полей были вычислены длины каждого объекта таблицы на местности с использованием функции *\$length*. Все изолинии длиной менее 10 метров были выделены и удалены.

Следующим и основным этапом редактирования была полностью ручная корректировка геометрии слоя. Территория ледниковой части оказалась самым сложным участком среди всего оазиса по ряду причин. Во-первых, специфичный и резко отличающийся от свободных ото льда территорий рельеф не поддается «базовому» дешифрированию, о чем было упомянуто ранее. Во-вторых, территория ледниковой части является самой большой и, соответственно, трудоемкой, что подтверждает количество «планшетов», на которые поделен участок для планомерной генерализации. Общий объем работы составил 178 участков (7,12 км²).

В целях рациональной организации процесса редактирования и разделения задач было решено провести анализ территории ледника и дать оценку сложности и трудоемкости каждому отдельному планшету. Результатом анализа стала схема разбиения ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн на планшеты, содержащая нумерацию участков и наглядное отражение прогресса редактирования (рисунок 18).



Рисунок 18. Схема разбиения ледниковой части оазиса Холмы Ларсеманн на планшеты с отраженным прогрессом редактирования территории

Схема была сделана на основной объект дешифрирования – ледниковую часть оазиса Холмы Ларсеманн, обозначенную впервые на летней производственной практике.

Зеленым цветом на схеме закрашены планшеты, которые подлежали редактированию без особых рекомендаций, их доля составила 1/3 от общего объема. Зачастую это наиболее пологие участки ледника, не деформированные движением, либо участки, приуроченные к территориям, свободным ото льда. Дешифрируемые самостоятельно планшеты не содержат сложных элементов и могут быть выполнены по всем правилам, определяющим составление крупномасштабных топографических планов.

Красным цветом на схеме закрашены планшеты, дешифрирование которых требует привлечение архивных материалов, изучение опыта и результатов дешифрирования и картографирования ледниковых поверхностей других исследователей. Наибольшую трудоемкость представляют участки, расположенные на северной половине ледника, где движение поверхности проявлено в виде огромного количества трещин, впадин и прочих депрессий (рисунок 19). Здесь необходима консультация специалистов в области гляциологии и исследователей с антарктическим экспедиционным опытом, возможно, видевших «вживую» часть того, что изображено на снимках. Это важно, поскольку проблемы не только в детерминировании и дешифрировании ледниковых участков по всей территории оазиса, но и в том, что часть горизонталей могут изображать рельеф не таким, какой он есть на самом деле.

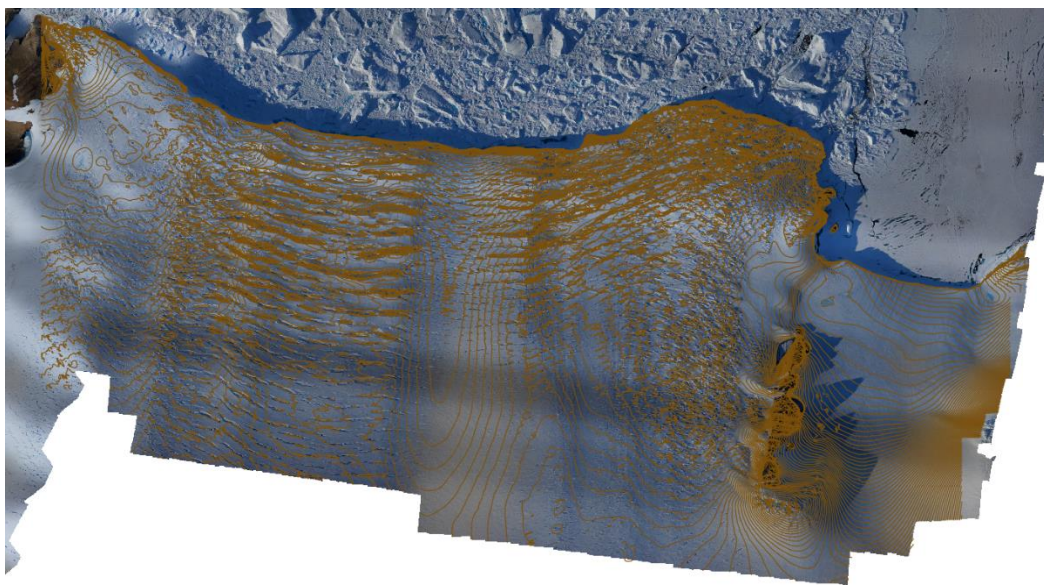


Рисунок 19. Векторный слой изолиний на территорию ледниковой части оазиса (прослеживается тенденция увеличения плотности горизонталей с юга на север)

Редактирование и генерализация горизонталей рельефа «зеленых» участков осуществлялось сокращением числа узлов векторных линий, придания им «плавности» прорисовыванием отдельных отрезков с сохранением общего положения и тренда изолиний, устранением угловатости и «рваности» замкнутых горизонталей, распутыванием пересекающихся и «растаскиванием» близко расположенных друг к другу линий. Слою был присвоен настроенный предварительно стиль, предполагающий утолщение каждой пятой горизонтали. Присвоение происходило с помощью запросов SQL в QGIS в атрибутивной базе данных. Каждой кратной 10 изолинии присваивался коэффициент равный числу 2, остальным – 1.

В процессе работы над участком были также добавлены отметки высот, имеющие большое значение для визуализации рельефа поверхности. Расположение отметок высот выбирается в характерных точках рельефа: в местах ощутимого изменения крутизны склона, на вершинах возвышенностей, в точках перегиба (рисунок 20).

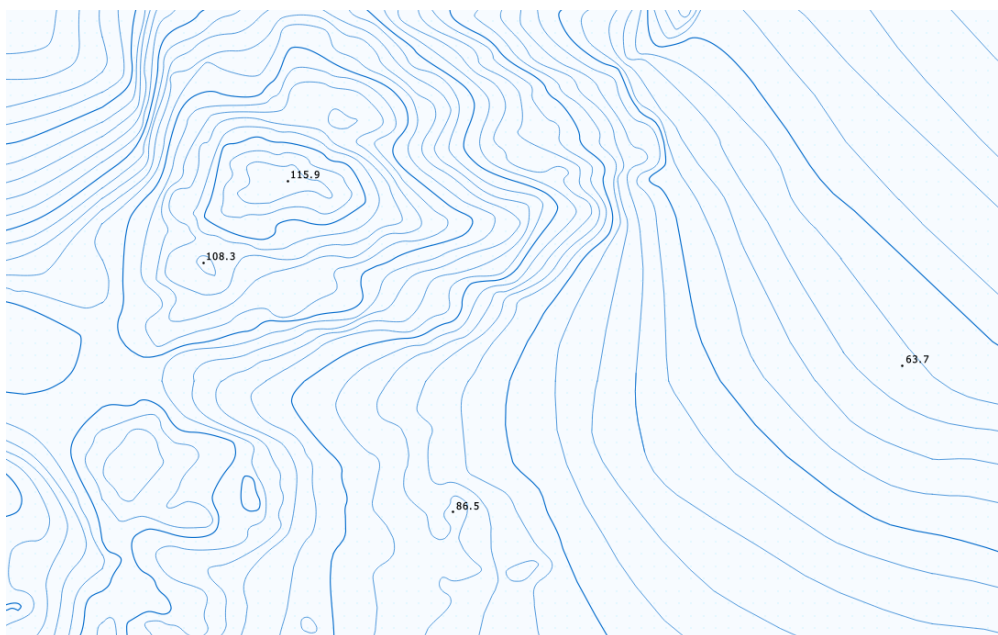


Рисунок 20. Отредактированный фрагмент слоя изолиний рельефа. Отображены слои отметок высот и суши

3.3.3. Сравнение результатов дешифрирования с картами австралийской картографической службы

Оазис Холмы Ларсеманн на данный момент не был изображен на картах в крупномасштабном варианте с достаточным для сравнения уровнем детализации съемки

с БПЛА. Тем не менее карты, на которых отображена в том числе и поверхность ледника Долк, могут служить в качестве общего сравнительного материала для будущих результатов дешифрирования ледниковой поверхности оазиса, поскольку они сделаны на ту же территорию.

Среди картографического материала были найдены крупномасштабные карты масштаба 1:25000 (рисунок 21), датированные 2005 годом и составленные на территорию полуострова Брокнес антарктического оазиса Холмы Ларсеманн по результатам аэросъемки февраля 1998 года.

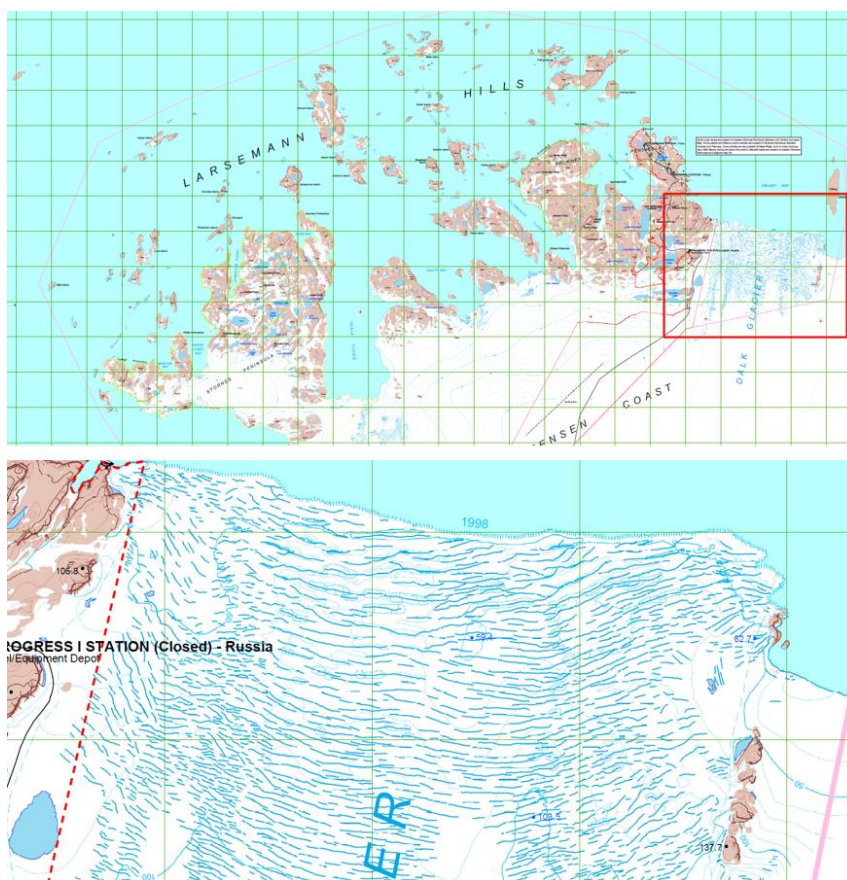


Рисунок 21. Карта на полуостров Брокнес с отдельно увеличенным фрагментом изображения ледниковой поверхности, 2005 г. (<https://data.aad.gov.au>)

Данные на ледник Долк, частично отображенный на карте, были получены с космического снимка со спутника Landsat 7. Высота сечения рельефа составляет 10 метров. К карте дана подробная легенда, составителями являются специалисты Австралийского центра. В легенде карты используемыми для изображения рельефа ледника условными знаками являются: точки высот (elevation on ice), береговая линия (ice coastline), фронт ледника (glacier front), линия заземления ледника (glacier grounding line), расщелины (crevasse), основные утолщенные изолинии (index contour on ice),

основные изолинии (intermediate contour on ice), контур депрессий на льду (depression contour on ice).

В силу масштаба и требований к генерализации картографического изображения ледниковая поверхность показана на карте в виде площадного объекта с нанесенными изолиниями, точками пороговых высот (понижений), линиями заземления и границами ледника. Особое внимание следует уделить изображению деталей рельефа, представленных линиями разной длины и направленности, что говорит о локализации знаков и соблюдения конфигурации трещин (разломов). Условное обозначение депрессий также является линейным знаком и применяется в качестве контура особо крупных отрицательных форм рельефа.

Нанесенные в центральной части ледника изолинии практически исчезают в огромном количестве линейных трещин, из-за чего сложно говорить о четком представлении рельефа данного участка. По краям, особенно в правой части, горизонтали выходят на передний план и позволяют сделать выводы о схожести ранее построенных нами горизонталей и представленных на карте (рисунок 22).

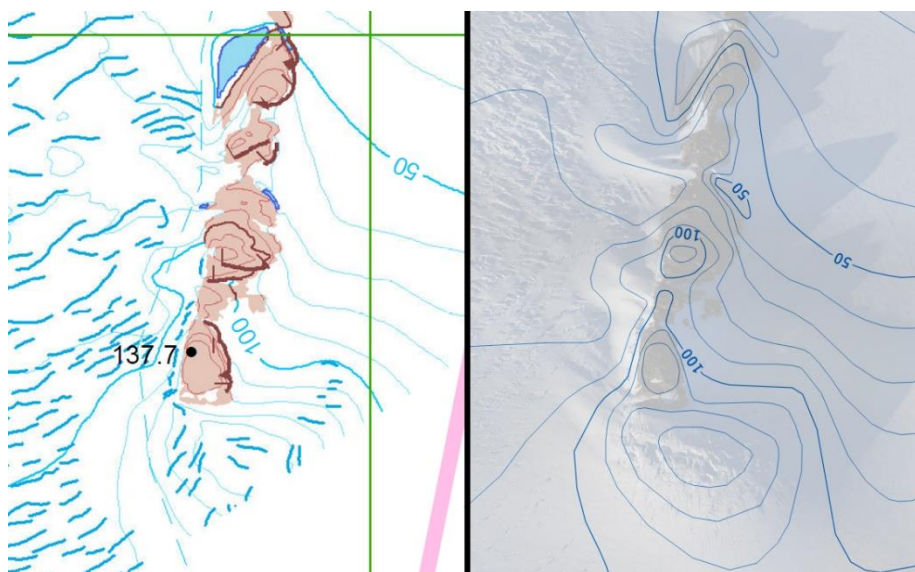


Рисунок 22. Изолинии на фрагменте карты полуострова Брокнес (слева) и изолинии, построенные по данным съемки БПЛА (справа)

В качестве другого примера изображения изучаемой территории можно привести карту, составленную на Землю Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида (рисунок 23).

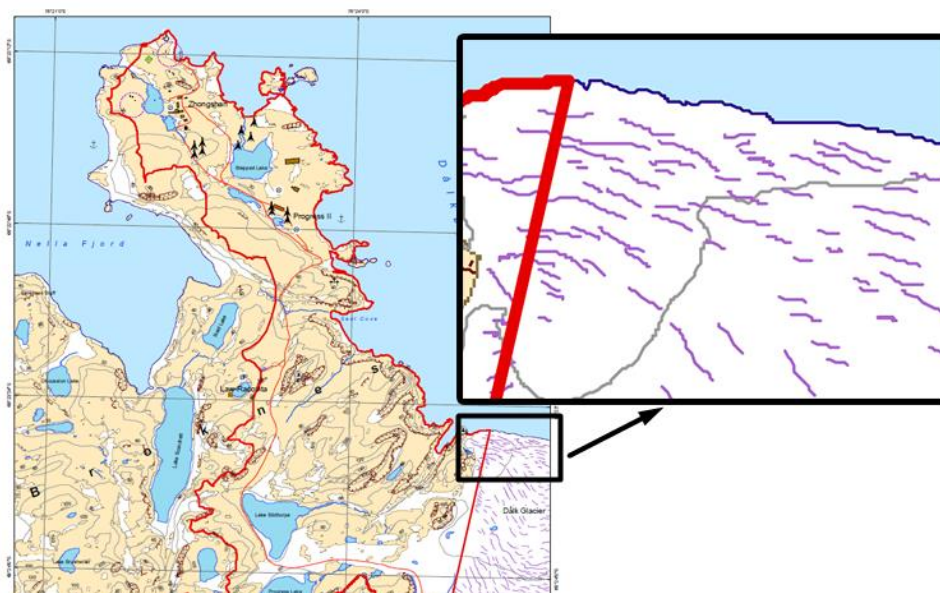


Рисунок 23. Фрагмент карты Земли Принцессы Елизаветы, на котором изображена территория ледника Долк, Восточная Антарктида (2007) (<https://data.aad.gov.au>)

Карта масштаба 1:18200, опубликованная в марте 2007 года Секцией Антарктических территорий, окружающей среды и политики, Центром антарктических данных Австралийского антарктического отдела и Департаментом окружающей среды и водных ресурсов, косвенно затрагивает участок ледника Долк. Изолинии проведены с шагом 20 м, часть из них идет по поверхности ледника. Способ дешифрирования и изображения элементов рельефа схож с картой масштаба 1:25000 и представляет собой линейный условный знак, повторяющий форму трещин (расколов) и сохраняющий их расположение.

Глава 4. Разработка каталога форм рельефа ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн и рекомендации к дешифрированию

4.1. Назначение и структура каталога

Для осуществления полноценной и грамотной работы с территорией ледниковой части оазиса Холмы Ларсеманн, представленной ледником Долк, необходимо не просто присвоить каждому отдельно разбитому участку степень сложности, но и обосновать саму сложность, из чего она складывается, как разрешается и после каких действий можно приступить к редактированию горизонталей.

В разделе 3.3.1. описывается особенность территории, из которой вытекает главная проблема – сложность интерпретации форм поверхности и подбора к ним способов редактирования и изображения условными знаками. Чтобы упростить задачу детерминирования и дешифрирования подобных объектов и определить в рамках данного участка общие правила их изображения на крупномасштабных топографических планах, было принято решение собрать некий каталог, включающий в себя самые спорные и неоднозначные формы рельефа поверхности ледника, вызывающие больше всего вопросов.

Главная цель каталога – интегрировать наиболее полную информацию о разновидностях микроформ ледникового рельефа оазиса Холмы Ларсеманн и сопровождать ее визуальным представлением, текстовым описанием и блоком рекомендаций к дешифрированию объектов, отобранных таким образом, чтобы они всесторонне представляли рельеф территории ледника.

Создание каталога было продиктовано отсутствием материалов и рекомендаций к детальному дешифрированию поверхности ледника, поскольку данные такой точности были получены впервые, а значит открылась возможность провести дешифрирование и подробный разбор поверхности в плане рельефа и его изображения на топографических планах вместе с остальным оазисом.

Предполагается, что каталог будет применим не только к леднику Долк, на территорию которого он разрабатывается, но и к другим покровным и выводным ледникам и ледниковым поверхностям, которые имеют схожий тип, свойства и характер движения.

Структура каталога должна быть продумана таким образом, чтобы на все возникающие в ходе дешифрирования ледниковой поверхности оазиса вопросы отвечать исчерпывающими рекомендательными установками, а также способствовать идентификации той или иной формы рельефа достаточным количеством качественно

оформленных изображений как самих объектов, так и вариантов их отображения автоматически построенными горизонталями.

За каждым объектом будет закреплён порядковый номер, к которому в соответствии с нумерацией планшетов будет дополнительно припечатан номер участка, на котором он был выделен. Это ускорит внутреннюю навигацию по объектам для тех, у кого будет возможность работать с проектом напрямую, подключив слой границ планшетов и порядковых номеров.

Одним из двух ключевых разделов каталога является раздел, в котором будут содержаться визуальные образцы форм рельефа, представленные в виде фрагмента отрофотоплана и наложенного на этот фрагмент слоя автоматически построенных горизонталей. Двойное изображение даёт первичное представление о возможном варианте построенных изолиний, после чего можно будет сделать выводы как о схожести редактируемых объектов с представленным, так и корректности самих данных. Немаловажным является вопрос масштаба, в котором будут выполнены изображения. Было принято решение в пользу одинакового для всех объектов масштаба топоплана 1:2000 для того, чтобы при написании рекомендаций четко понимать размеры объекта и их соотношение с рельефом в рамках выбранного масштаба.

Следующий раздел каталога будет посвящён характеристике объектов в следующей форме:

- тип;
- подтип;
- встречаемость на территории ледника;
- краткое визуальное описание.

Выделение типов и подтипов форм рельефа будет происходить строго в рамках каталога для данной конкретной территории и подробно описано в разделе 3.3.2. Встречаемость будет показывать, насколько часто придется сталкиваться с подобными формами при осуществлении дешифрирования ледника. Описание будет носить произвольный характер, целью которого является подкрепление изображений с объектами текстовой аннотацией.

Второй главный и заключительный раздел каталога будет посвящён рекомендациям к дешифрированию выделенных объектов. Особенностью будет демонстрация реальных примеров помимо текстовых указаний. Для каждого из объектов необходимо определиться с интерпретацией горизонталей и условными знаками, проконсультировавшись со специалистами в области гляциологии и картографии, либо

предложить авторские методы их дешифрирования и описать тонкости подхода к их отображению на крупномасштабных топографических картах.

Принятие решения по способу дешифрированию основных форм рельефа ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн откроет возможность к дешифрированию всей поверхности ледника, поскольку большинство из них будет изображено по аналогии с другими, более ярко выраженными и наиболее универсальными вариантами этих объектов.

4.2. Выделение сложных для дешифрирования форм рельефа и формирование первичного каталога объектов

Основная задача каталога – охватить всю заснятую поверхность, произвести визуальный анализ доступной территории и собрать наибольшее количество самых трудноинтерпретируемых и труднодешифрируемых участков для их отдельного анализа, консультации со специалистами и принятия решения по способу и виду их отображения на топографическом плане.

В ходе формирования базы каталога в виде сложных объектов рельефа ледниковой поверхности был произведен тщательный визуальный анализ всех 178 участков, на которые была разделена ледниковая поверхность оазиса Холмы Ларсеманн.

Выделение сложных для дешифрирования форм рельефа происходило по следующим принципам:

- наличие сильной расчлененности рельефа;
- большие перепады высот и, как следствие, скопление горизонталей;
- участки, перекрытые тенью, искажающей истинное восприятие рельефа;
- участки, для изображения которых необходимо использовать дополнительные условные знаки;
- участки, целесообразность дешифрирования которых может находиться под вопросом.

Рельеф территории был подвергнут тщательному визуальному анализу, в результате которого был собран графический материал для формирования первичного каталога объектов поверхности (рисунок 24).

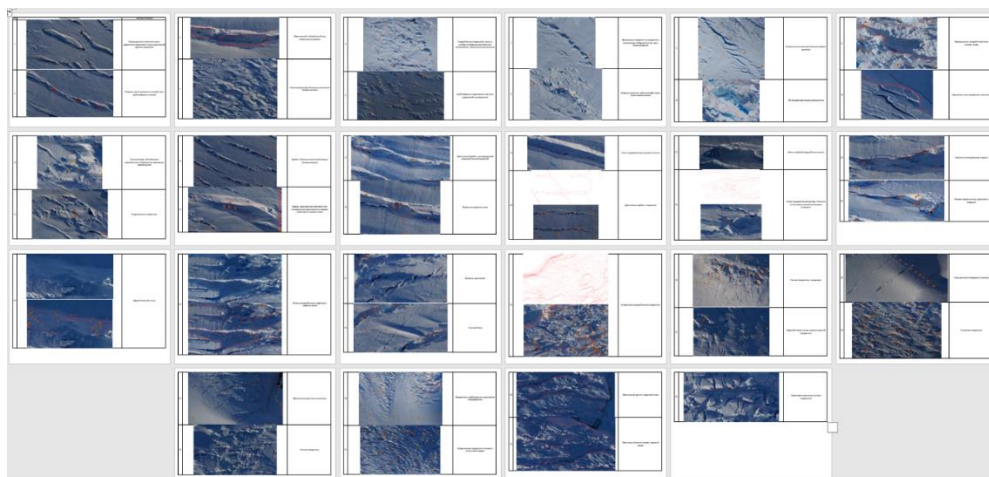


Рисунок 24. Первичный каталог объектов ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн, реализованный в MS Word

Первичный каталог представляет собой таблицу, наполненную изображениями разного масштаба и размера, а также краткими описаниями к ним. Его создание является первым этапом реализации интегрированного документа с рекомендациями по дешифрированию, отражающего многообразие и сложность поверхности ледниковой части оазиса.

В рамках начального этапа было выделено 40 объектов, равномерно распределенных по всей территории ледника и определяющих наиболее характерные для тех или иных участков формы рельефа и их специфику (рисунок 25).

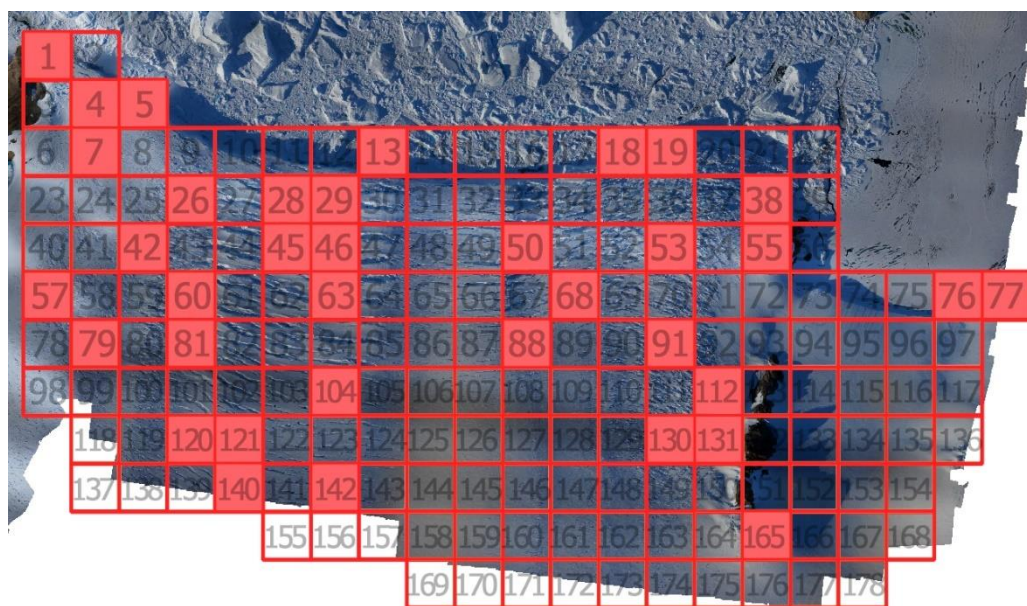


Рисунок 25. Схема разбиения ледниковой части оазиса Холмы Ларсеманн на планшеты (красным выделены участки, из которых были взяты объекты для каталога)

Проанализировав схему, можно сделать вывод том, что самые «проблемные» для дешифрирования участки ожидаемо приурочены к области наибольшей деформации поверхности вследствие движения ледника. Самыми распространенными формами являются впадины (рисунок 26), сконцентрированные в левой части ледника и увеличивающиеся в размерах при движении с юга на север. В ходе визуального отбора было взято несколько разных конфигураций данной формы рельефа, поскольку применимые в их отношении правила изображения на топографических планах могут отличаться в зависимости от размера объекта.

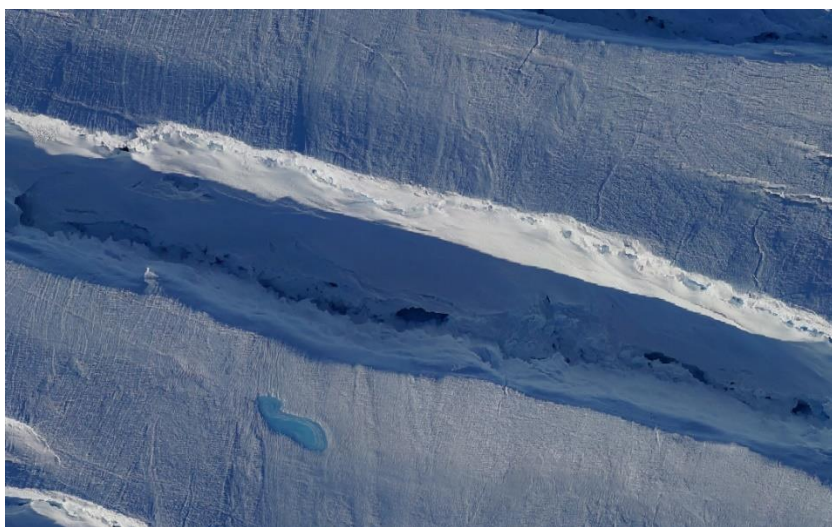


Рисунок 26. Впадина

Концентрация реже всего встречающихся объектов находится в непосредственной близости к краю ледника. Это обусловлено тем, что там происходит самое интенсивное рыхление поверхности и откол айсбергов. В отличие от широко распространенных и часто встречающихся форм рельефа средней части территории, уникальность некоторых на северной границе ледника практически абсолютна.

Главная задача начального этапа, поставленная как развернутое визуальное представление о многообразии рельефа ледниковой поверхности оазиса, была реализована совокупностью наиболее характерных для территории форм рельефа, как уникальных, так и распространенных его проявлений, упорядоченной в виде таблицы с персональным кратким описанием каждого объекта для их упрощенной идентификации и расширенной характеристики.

Дальнейший этап предполагает классификацию отобранных объектов внутри каталога, их сортировку, качественное визуальное оформление и снабжение рядом рекомендаций, как текстовых, так и графических.

4.3. Классификация форм рельефа и их характеристика

Перед осуществлением поиска дешифровочных и картографических решений в отношении сформированных в каталог объектов рельефа ледниковой поверхности необходимо установить тип каждой отдельной формы и иметь четкое представление о том, как это выглядит в действительности. Помимо того, что большинство ледниковых атласов и пособий по дешифрированию морских и других льдов (ссылки) не дают исчерпывающих данных, применимых к изучаемой территории, масштаб форм рельефа в них гораздо менее детальный и позволяет отображать только внушительные и заметные элементы рельефа с устоявшейся и принятой терминологией. Источники данных такого плана могут быть справедливо использованы в адаптации понятий и описаний объектов более крупного масштаба.

Было принято решение классифицировать отобранные объекты на типы и подтипы с целью систематизации каталога и формирования общего характера изображения с помощью горизонталей и условных знаков каждой отдельной группы форм. При проработке принципов классификации была изучена дополнительная литература, в которой решена похожая задача (Wesche, 2013). Автор разделил обнаруженные поверхностные структуры шельфового ледника в зависимости от их ориентации относительно среднего стабильного фронта отела на параллельные, ортогональные и комбинацию обоих.

Особенности детального изображения ледниковой поверхности заключаются в том, что одной пространственной ориентацией не добиться объективности в определении общих типов объектов. Во внимание были приняты доступные для анализа величины углублений, крутизна склонов и перепады высот, определены принципиальные различия и схожие черты между различными формами рельефа.

В результате анализа наполнения первичного каталога с учетом вышеупомянутых аспектов была составлена классификация объектов рельефа ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн по пяти типам, четыре из которых подразделяются на подтипы, выделенные ввиду широкого разнообразия внутри групп (рисунок 27).

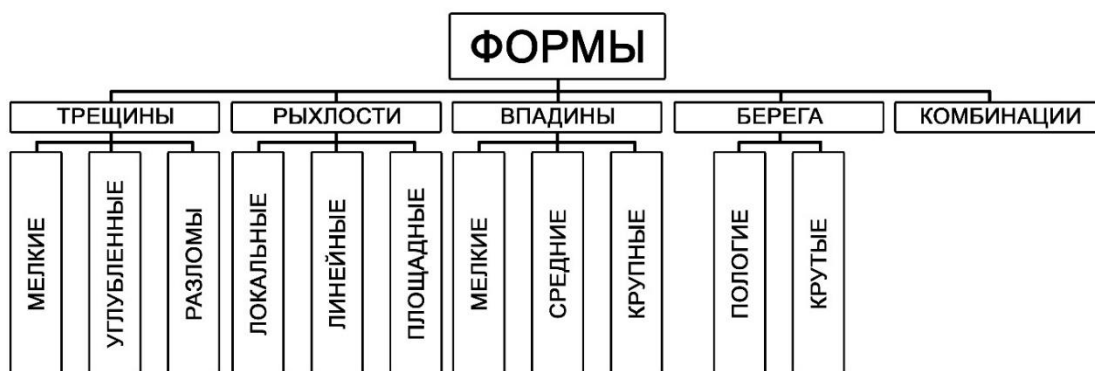


Рисунок 27. Классификация форм ледниковой поверхности оазиса по типу и особенностям рельефа

При распределении объектов в рамках установленной классификации была пересмотрена принципиальная универсальность некоторых из них, в результате чего из каталога были исключены 8 форм, причисленных к разным типам. Данное действие не лишает каталог заявленной информативности и разнообразия, но сокращает количество случаев дешифрирования условно одних и тех же объектов, расположенных в разных частях ледника.

Количественная характеристика каталога показывает, что наиболее распространенными и, следовательно, рассматриваемыми объектами являются впадины, рыхлости и трещины (рисунок 28). Реже в каталоге встречаются формы рельефа типа «берега» ввиду своей локализации на границе ледника и некоторой однообразности, и «комбинации», выделенные для демонстрации слияния нескольких типов объектов одновременно.



Рисунок 28. Доля типов форм рельефа ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн

Чуть больше четверти каталога представлены объектами с типом «трещины». Трещины представляют собой узкие углубления, образованные в результате естественного движения поверхности ледника и имеющие вертикальные или близкие к вертикальным стенки. Термин «трещины», как и в случае остальных типов классификации, используется в качестве обобщающего понятия, предназначенного для отражения характера объектов, разделенных на подтипы (рисунок 29).

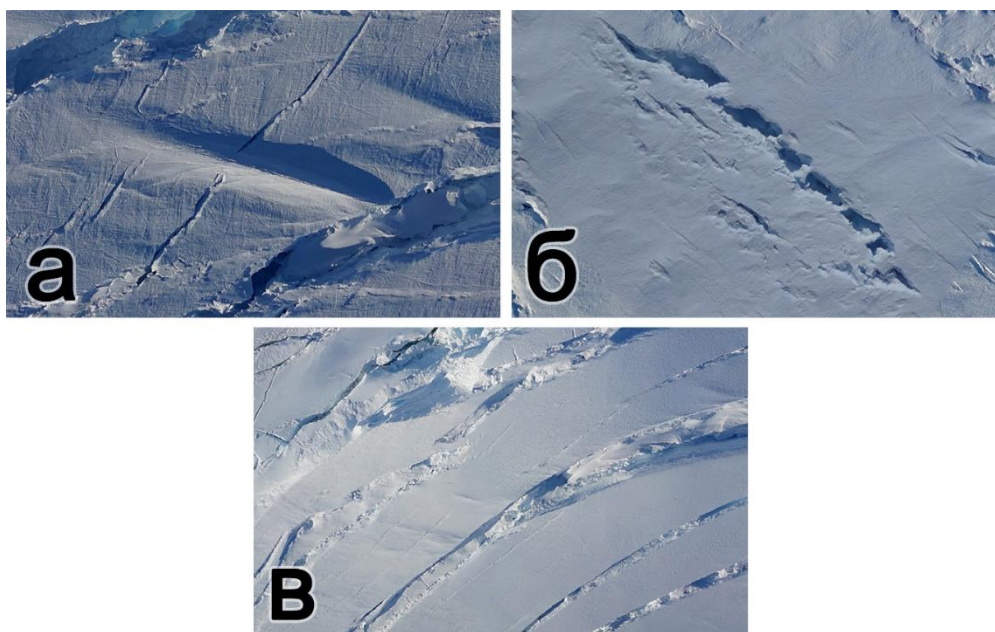


Рисунок 29. Трещины, встречающиеся на поверхности ледника Долк (а – мелкие, б – углубленные, в - разломы)

Мелкие трещины шириной от 1 до 5 метров относительно равномерно распределены на поверхности и встречаются не только в качестве основных особенностей рельефа конкретных участков, но и часто интегрированы в другие формы рельефа, либо вместе с ними представляют комбинированный типа рельефа. По конфигурации они могут изгибаться, включаться в другие трещины и перерастать в разломы. Углубленные трещины отличаются более серьезным разрывом местности, о чем свидетельствуют ортофотопланы и цифровая модель рельефа. Эти формы, как и мелкие, встречаются на всей территории ледниковой поверхности и способствуют дальнейшему образованию глубоких впадин. Разломы являются самым массивным подтипом трещин и встречаются в местах интенсивного движения ледника ближе к его северной границе. Их ширина может достигать 20 метров.

Рыхлостями в каталоге отмечены объекты, морфологическая особенность которых заключается в слабо выраженной структуре рельефа при его повторяемости в

границах отдельных участков поверхности. Такие формы могут образовывать линейные гряды наледей, заполнять отдельную площадь ледника однообразными морфоскульптурами или встречаться в виде локальных явлений по всей поверхности (рисунок 30).

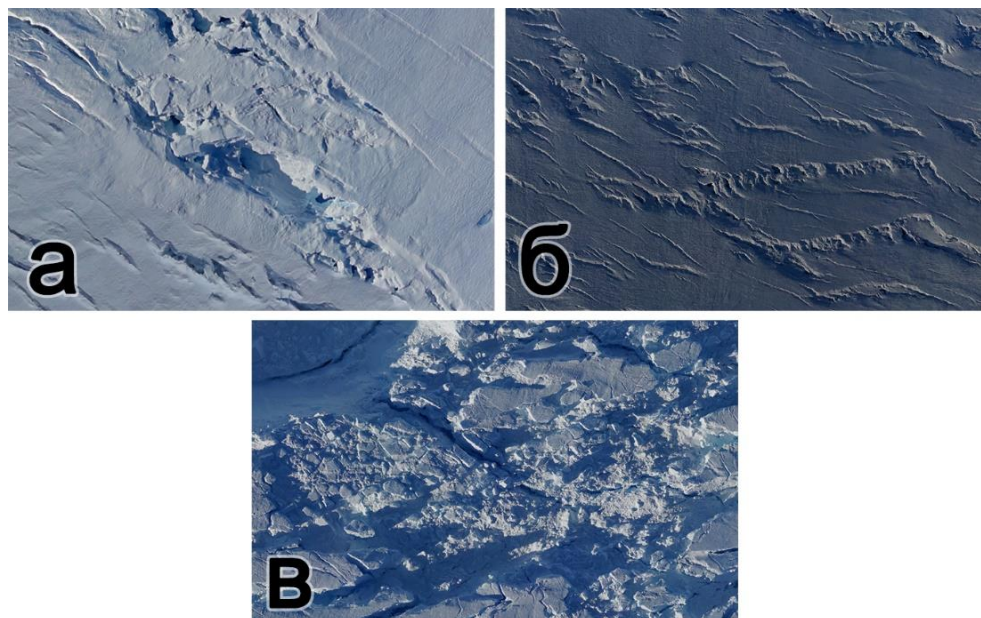


Рисунок 30. Рыхлости, встречающиеся на поверхности ледника Долг (а – локальные, б – линейные, в - площадные)

Самым многообразным типом рельефа, встречающимся на ледниковой поверхности оазиса являются впадины (рисунок 31). Это замкнутые понижения относительно окружающей местности, длина которых в среднем составляет 100-150 м. На территории ледника преобладают протяженные поперечные фронты отела впадины, увеличивающиеся в размерах и глубине в направлении с юга на север. Преимущественно данная форма рельефа встречается в западной части ледника и образует сплошной участок, составляющий 20% от всей поверхности. На остальной территории встречаются реже либо наравне с остальными проявлениями рельефа ледника.

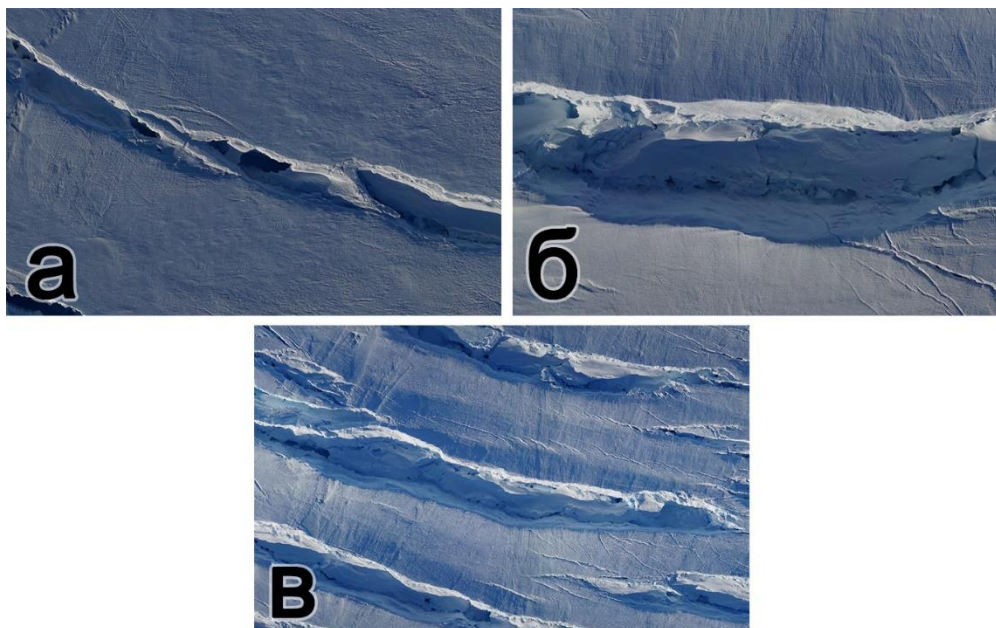


Рисунок 31. Впадины, встречающиеся на поверхности ледника Долк (а – мелкие, б – средние, в - крупные)

Классификация впадин на подтипы основывается на их пространственном размере и отображении в масштабе топографической основы 1:2 000. Мелкие впадины от 30 до 100 м в длину и от 6 до 10 м в ширину встречаются преимущественно в южной части ледника, наиболее пологой и целостной. Средние впадины от 100 до 200 м в длину и от 10 до 20 м в ширину располагаются в западной и восточной центральных частях и нередко скрещиваются с другими формами, образуя комбинированный тип рельефа. Крупные впадины могут характеризоваться протяженностью до 450 м и в ширину достигать 40 м. Наиболее ярко этими формами представлен северо-западный участок ледника, в большей степени деформированный движением поверхности.

Специфика данных съемки с помощью БПЛА состоит в том, что на выходных ортофотоизображениях из-за присутствия солнечных лучей и теней, которые отбрасывают объекты, восприятие рельефа сильно искажается, ввиду чего отрицательные формы рельефа могут выглядеть как возвышенности, а истинная глубина впадин, полученная с данных ЦМР, может отличаться от степени затемнения этого участка тенью.

Чтобы разрешить вопросы причастности тех или иных объектов к типу впадин, было опробовано несколько способов:

- Сопоставление ортофотоплана с цифровой моделью рельефа;
- Консультация со специалистом в области гляциологии;
- Просмотр отдельных изображений под стереоскопом.

В результате всех проведенных действий было установлено, что предполагаемые формы рельефа являются впадинами.

Берега и комбинации различных форм в совокупности составляют 1/4 каталога и являются более уникальными, чем впадины, рыхлости и трещины. Комбинированный тип встречается на всей территории ледника, поскольку его специфика не может быть полностью отражена в каталоге из-за широкого разнообразия, а береговые формы приурочены к границе ледника и главным образом представляют собой либо относительно пологий скат, либо ледовый обрыв.

4.4. Рекомендации по дешифрированию форм ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн

Одной из главных задач работы является не только поднятие проблемы сложности дешифрирования ледниковой поверхности оазиса и описание особенностей ее рельефа, но и предложение способов изображения отдельных встречающихся на территории ледника морфоскульптур и форм для топографических планов масштаба 1:2 000.

Ранее было установлено, что технические документы, определяющие условные знаки для топографических карт Антарктики, не рассчитаны на такой крупный масштаб. Описанные там условные обозначения предполагают, что ледниковый рельеф будет иметь огромные формы рельефа, отображающиеся на картах и планах в масштабе от 1:5 000 до 1:1 000 000. Универсальные же знаки в виде утолщенных, основных и дополнительных изолиний применимы к любому масштабу.

Поиск материалов исследований ледниковой поверхности показал, что основным предметом изучения является ледник в целом. Отдельному рассмотрению придается фронт отела ледниковой поверхности и крупные разломы, к которым применяют технологии автоматического распознавания, мониторинга и дешифрирования, взяв за основу данные дистанционного зондирования. Исследования производятся в среднем и мелком масштабе, что для детального изучения может быть полезно только общими выводами и закономерностями.

При составлении рекомендаций к дешифрированию ледниковой поверхности имеющейся детализации упор делался на интерпретацию полученного слоя автоматически построенных по данным цифровой модели рельефа изолиний с шагом в 1 и 2 метра. За образец изображения форм ледниковой поверхности на топографических

картах были взяты условные знаки из ГКИНП «Условные знаки для топографических и общегеографических карт Антарктики» (рисунок 32)

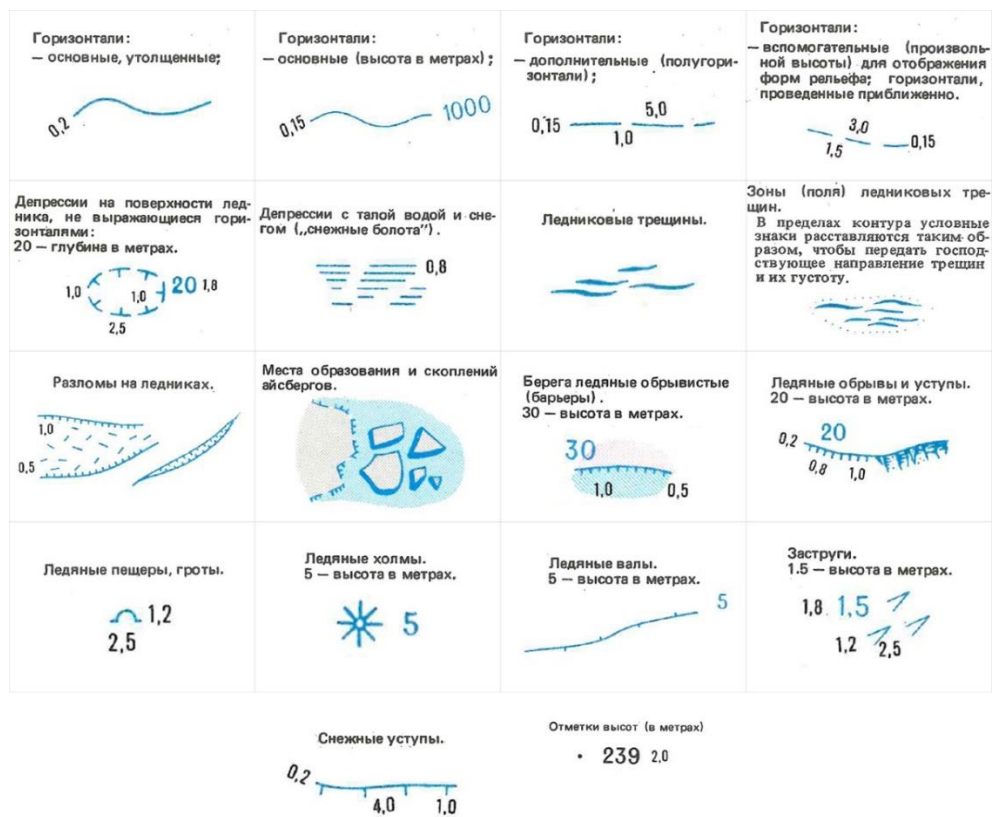


Рисунок 32. Условные обозначения для топографических и общегеографических карт из раздела «ледниковые поверхности» (Условные знаки..., 1989)

Ввиду особенностей цифрового картографического языка условных знаков не все обозначения могут быть в точности реализованы как в издании. Например, в ПО QGIS, несмотря на широкие возможности выбора стилей и кастомизации условных знаков, нет возможности задать утончение линейного объекта к краям и регулировать динамику ширины линии, что является принципиально важным при картографировании ледниковых трещин.

В ходе написания рекомендаций к обсуждению были привлечены специалисты в области гляциологии и опытные картографы для принятия оптимальных и грамотных оформительских решений по отношению к дешифрируемым формам. Был проведен ряд консультаций, на которых демонстрировался каталог объектов на финальных этапах его формирования.

Далее приведены рекомендации к дешифрированию выделенных типов форм рельефа.

1. Рекомендации, относящиеся к дешифрированию и картографированию трещин каждого из подтипов, содержат указания к способу изображения, стилю условного знака и рекомендуемые размеры в миллиметрах. Мелкие и углубленные трещины изображать линейным условным знаком заданного цвета (синий) и толщины (для мелких – 0,3 мм, для углубленных – 0,5 мм). Разломы изображать площадным условным знаком, соответствующим знаку «разломы на ледниках» в ГКИНП (Условные знаки..., 1989). Толщину контура установить 0,5 мм, цвет синий. Сопроводить объекты в рамках каталога примерами дешифрирования (рисунок 33).

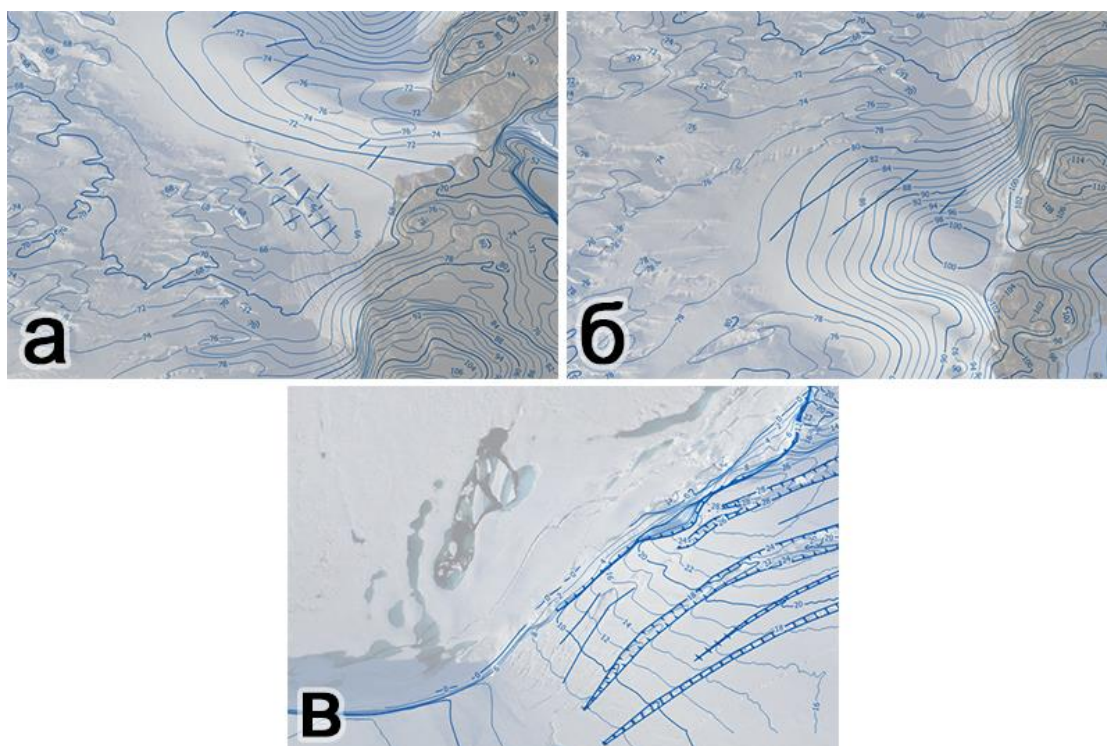


Рисунок 33. Образцы дешифрирования трещин (а – мелкие, б – углубленные, в - разломы)

2. Содержание рекомендаций по дешифрированию и картографированию впадин каждого из подтипов включает указания по способу изображения, стилю условного знака и рекомендуемые размеры в миллиметрах. Мелкие впадины изображать основными и дополнительными горизонталями (при глубине более двух метров). Для основных горизонталей установить общепринятый синий цвет (для изолиний, проходящих по леднику), толщину 0,15 мм для основных и 0,25 мм для утолщенных. Для дополнительных горизонталей установить толщину 0,15 мм, расстояние между пунктирами 1 мм, длину одного пунктира 5 мм. Некоторые впадины дополнить отметками высот (понижений), изобразить в виде точечного знака черного цвета

диаметром 0,5 мм. Рекомендуется наносить от 5 на 15 высотных отметок на 1 дм² в масштабе плана (Условные знаки..., 1989). При изображении средних и крупных впадин придерживаться установленных для мелких впадин рекомендаций. Границы впадин изображать линейным условным знаком, соответствующим знаку «депрессии на поверхности ледника» в ГКИНП (ссылка). Толщину контура установить 0,5 мм, длину прямоугольного маркера 1 мм, расположение внутреннее, цвет синий. Сопроводить объекты в рамках каталога примерами дешифрирования (рисунок 34).

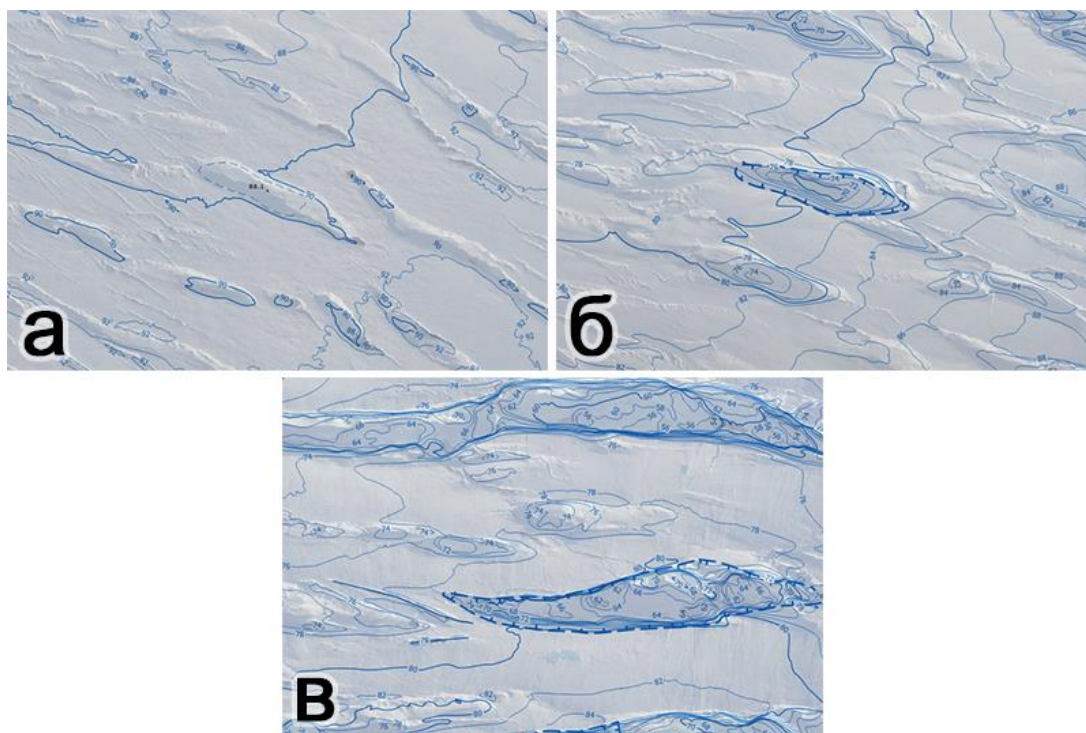


Рисунок 34. Образцы дешифрирования впадин (а – мелкие, б – средние, в - крупные)

3. При дешифрировании рыхлостей рекомендуется использовать автоматически построенные изолинии с введением дополнительных горизонталей в местах наиболее выраженного рельефа (углублений, возвышенностей). Исходя из конфигурации каждого из подтипов рыхлостей наиболее характерные места рельефа дополнить отметками высот (понижений), изображать в виде точечного знака черного цвета диаметром 0,5 мм. Рекомендуется наносить от 5 на 15 высотных отметок на 1 дм² в масштабе плана. При оформлении стиля изолиний придерживаться установленных для впадин рекомендаций. Сопроводить объекты в рамках каталога примерами дешифрирования (рисунок 35).

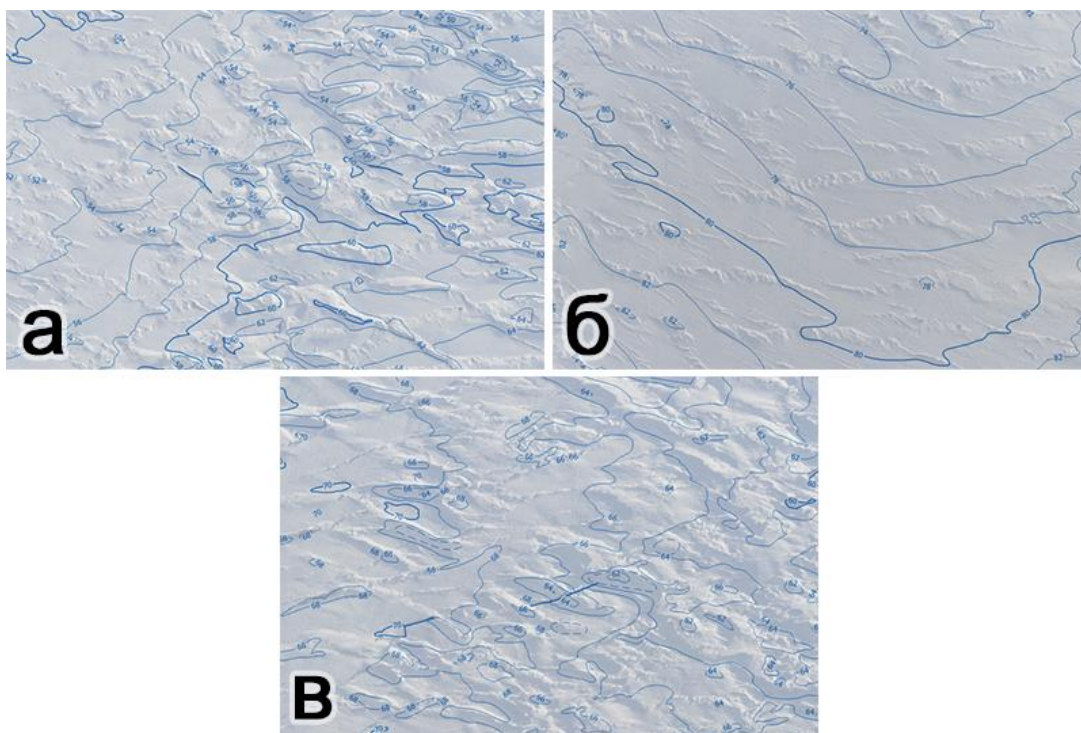


Рисунок 35. Образцы дешифрирования рыхлостей (а – локальные, б – линейные, в – площадные)

4. Дешифрирование объектов типа «берега» главным образом сопровождать очерчиванием береговой линии (обрыва). «Крутые» берега изображать линейным условным знаком, соответствующим знаку «ледяные обрывы» в ГКИНП, изображенному в виде маркированной линии. Толщину контура установить 0,5 мм, длину прямоугольного маркера 1 мм, расположение наружное, цвет синий. Границу «пологих» берегов изображать линейным условным знаком, соответствующим знаку «непостоянная (неопределенная) береговая линия» в ГКИНП, изображенному в виде пунктирной линии. Толщину линии установить 0,5 мм, расстояние между пунктирами 1 мм, длину одного пунктира 3 мм. В местах откола айсберга изобразить сам айсберг площадным объектом с заполнением в виде синих точек на белой заливке. Контур условного знака сделать равным 0,5 мм по ширине, цвет синий. Сопроводить объекты в рамках каталога примерами дешифрирования (рисунок 36).

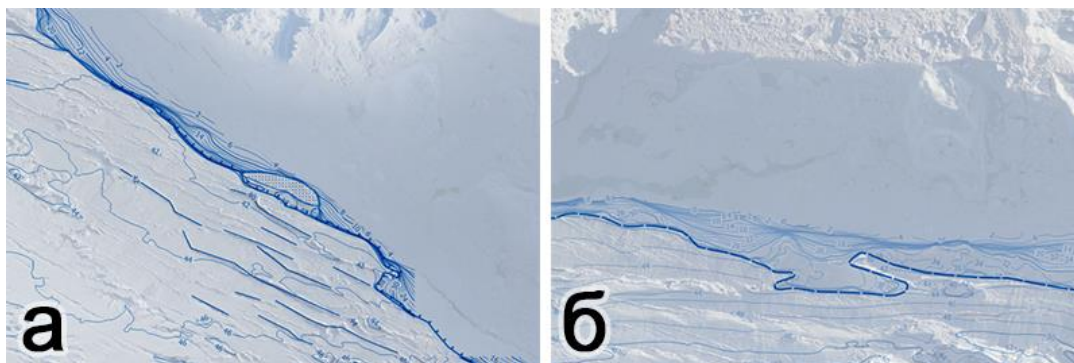


Рисунок 36. Образцы дешифрирования берегов (а – крутые, б – пологие)

5. Рекомендации для комбинированных форм интегрируют все установленные ранее условные знаки, требования к ним, стили и размеры. В зависимости от того, какие объекты рельефа находятся в слиянии друг с другом, в непосредственной близости или в переходе из одного в другой, применяются соответствующие условные обозначения. Это может быть трещина на дне впадины, разлом посередине площадной рыхлости или все вместе. Таких случаев на территории ледника достаточно много и рекомендация по их дешифрированию заключается в использовании уже предписанных остальным типам объектов указаний.

В результате проделанной работы страница каталога для каждой из форм имеет визуальное изображение (на снимке и с автоматически построенным слоем горизонталей), характеристику (включая тип, подтип, встречаемость, размеры (если определены) и краткое описание), блок технических рекомендаций и пример дешифрирования (рисунок 37).

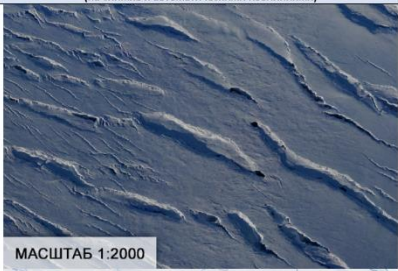
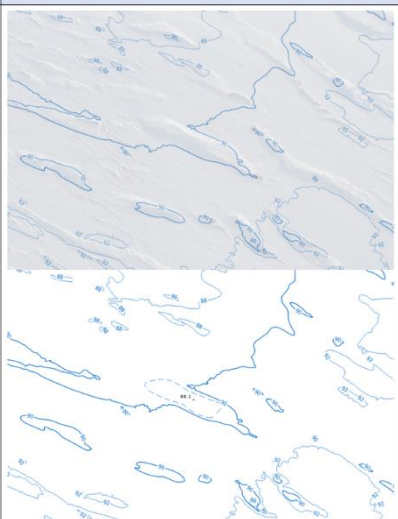
№ (пл.)	Изображение формы (на снимке и автоматически изолиниями)	Характеристика формы	Технические рекомендации	Пример дешифрирования
1 (120)	 <p>МАСШТАБ 1:2000</p>	<p>Тип: Впадина</p> <p>Подтип: Мелкая</p> <p>Встречаемость: Часто</p> <p>Краткое описание: Замкнутая отрицательная форма рельефа</p> <p>Протяженность: от 30 до 100 м</p> <p>Ширина: от 6 до 10 м</p>	<p>Рекомендации:</p> <p>Изображать основными и дополнительными горизонталями.</p> <p>Для основных горизонталей установить общепринятый синий цвет (для изолиний, проходящих по леднику), толщину 0,15 мм для основных и 0,25 мм для утолщенных.</p> <p>Для дополнительных горизонталей установить толщину 0,15 мм, расстояние между пунктирами 1 мм, длину одного пунктира 5 мм.</p> <p>Дополнить отметкой высот (понижений), изобразить в виде точечного знака черного цвета диаметром 0,5 мм.</p>	

Рисунок 37. Страница каталога для объекта №1

Благодаря проведенной классификации объектов структура каталога имеет упорядоченный и последовательный характер, описание способствует упрощению процесса идентификации остального рельефа территории, блок рекомендаций, подкрепленный примерами визуального изображения, предоставляет необходимые для дешифрирования установки.

Заключение

В ходе работы над ВКР были изучены физико-географические особенности Антарктиды и антарктического оазиса Холмы Ларсеманн, особое внимание было уделено рельефу и ледниковому покрову территорий. Рассмотрены технологии исследования континента с помощью таких методов, как аэрофотосъемка, космическая съемка и БПЛА (БВС).

Рассмотрена классификация ледников и их два ключевых типа – горные и покровные. Изучены формы рельефа, возникающие на ледниках, их встречаемость на отдельных типах ледниковых поверхностей, условные знаки, которыми они обозначаются на мелкомасштабных и среднемасштабных топографических и общегеографических картах, особенности дешифрирования и картографирования ледников в таких картах.

Выявлены проблемы автоматизированного построения рельефа по данным БПЛА, проанализированы основные недостатки автоматически сгенерированных изолиний и осуществлено их устранение с помощью ручного редактирования. Создан фрагмент топографической основы масштаба 1:2000 на ледниковую часть территории оазиса Холмы Ларсеманн.

Проведен тщательный анализ поверхности ледника, в ходе которого были отобраны 32 объекта для последующего описания и включения в первичный каталог форм рельефа ледниковой поверхности. Создана и применена классификация, разделяющая формы рельефа на впадины, рыхлости, трещины, берега и комбинированный тип.

В ходе работы все поставленные задачи были выполнены.

Достигнута цель работы: создание каталога форм ледниковой поверхности оазиса Холмы Ларсеманн с рекомендациями по их дешифрированию для топографической основы масштаба 1:2000 по данным съемки БПЛА. Каталог сопровождается изображениями самих объектов в масштабе плана, описанием форм с указанием типа, подтипа и встречаемости, техническими рекомендациями с указаниями к типу, стилю и размерам условных знаков, а также визуальными примерами дешифрирования каждого объекта.

Литература

1. Бардин В. И. В горах и на ледниках Антарктиды М.: Знание, 1989. – 192 с.
2. Бляхарский Д.П. Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА, Т. 63, № 6, 2019, С. 650-661.
3. Бушуев А. В., Волков Н. А., Лоцилов В. С. Атлас ледовых образований. – Ленинград: ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1974, 140 с.
4. Власова Т. В. Физическая география материков (с прилегающими частями океанов). В 2 ч. Ч 2. Южная Америка, Африка, Австралия и Океания, Антарктида: учеб. для студентов пед. ин-тов по спец. № 2107 «География». 4-е изд., перераб. М.: Просвещение, 1986, 269 с.
5. Грушинский Н. П., Дралкин А. Г. Антарктида, М.: Недра, 1988. – 199 с.
6. Гросвальд М. Г. Покровные ледники континентальных шельфов / Результаты исследований по международным геофизическим проектам. – М.: Наука, 1983. 216 с.
7. Долгушин Л. Д., Осипова Г. Б. Ледники М.: Мысль, Редакции географической литературы, 1989. – 447 с.
8. Ермаков Ю. Г., Игнатьев Г. М., Куракова Л. И. и др. Физическая география материков и океанов: учеб. Ф 51 для геогр. спец. ун-тов. Под общей ред. Рябчикова А. М. М.: Высш. шк., 1988, 592 с.
9. Захаров В. Г. Динамика выводного ледника Долк и гидрометеорологические условия в заливе Прюдс (Восточная Антарктида) в 1989/90 и 1994 гг. – Материалы гляциологических исследований, 2002, С. 169-177.
10. Зинченко О. Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования, «Ракурс», Москва, 2011 г., 24 с.
11. Котляков В. М. Тайны ледников М.: Знание, Естественнонаучный факультет № 5, 1965. – 65 с.
12. Котляров В. М., Захаров В. Г., Москалевский М. Ю. Дистанционный мониторинг колебаний края Антарктического ледникового покрова. Арктика и Антарктика // Арктика и Антарктика. – Т. 2. – 2003. – С. 48-62.

13. Медведев А. А., Алексеенко Н. А. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для тематического крупномасштабного картографирования // ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ. СБ. 144. КАРТОГРАФИЯ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ, С. 408–426.
14. Окишев П. А. Горные ледники и морфоскульптура ледниковых отложений Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет, 2017. – 204 с.
15. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1970, 18 с.
16. План управления особо управляемым районом Антарктики «Холмы Ларсеманн», Восточная Антарктика, ОУРА № 6, 41 с.
17. Пряхин С. С., Попов С. В., Сандалюк Н. В., Мартыанов В. Л., Поляков С. П. Аэрофотосъемка районов российских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лед и Снег, Т. 55, №4, 2015, С. 107-113.
18. Симонов И. М. Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеорологическое издание, 1971, 176 с.
19. Тушинский Г. К. Ледники, снежники, лавины М.: Географгиз, 1963. – 312 с.
20. Условные знаки для топографических и общегеографических карт Антарктики – М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1989, 22 с.
21. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. М.: Недра, 1989, 242 с.
22. Учебное пособие по курсу «Топографическое дешифрирование. Дешифрирование объектов земельного и городского кадастра», М., МГУГиК, 2007, 123 с.
23. Anshuman Bhardwaj, Lydia Sam, Akanksha, Rajesh Kumar UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects // Remote Sensing of Environment, No. 175, 2016, pp. 196-204.
24. Benjamin M.P. Chandler, Harold Lovell, Clare M. Boston Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice // Earth-Science Reviews, No. 185, 2018, pp. 806-846.
25. Celia A. Baumhoer, Andreas J. Dietz, Stefan Dech and Claudia Kuenzer Remote Sensing of Antarctic Glacier and Ice-Shelf Front Dynamics - A Review // Remote Sensing. Vol. 10. No 1445. 2018. pp. 1-28.

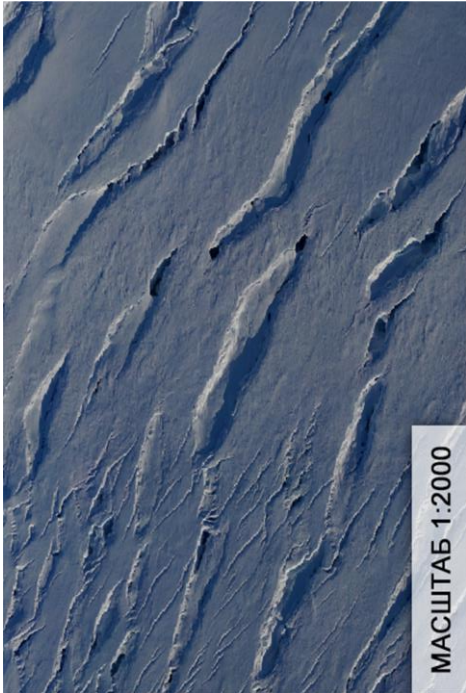
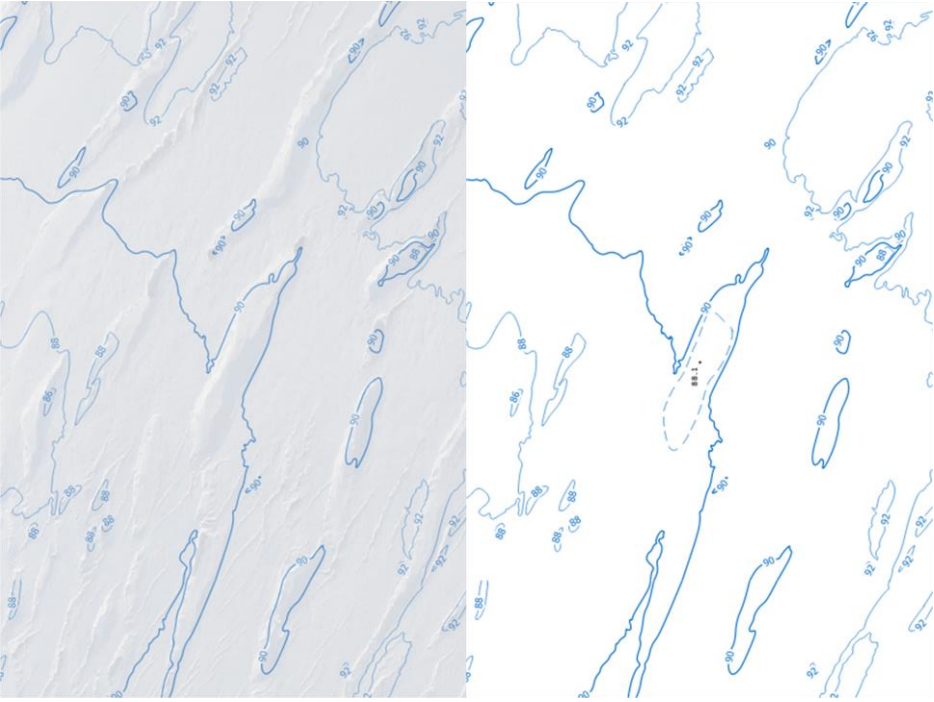
26. Chengke Zhou, Songtao Ai, Zemin Wang Determination of ice-flow velocity at the Polar Record Glacier and Dalk Glacier using DInSAR // *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, Vol. 23, No. 8, 2014, pp. 16-22.
27. Cláudio Wilson Mendes junior, Norberto Dani, Jorge Arigony-Neto A new topographic map for Keller Peninsula, King George Island, Antarctica // *Remote Sensing of the Cryosphere at the Brazilian National Institute for Cryospheric Sciences*, 2012, pp. 105-113.
28. Daniel McGrath, Konrad Steffen, Harihar Rajaram Basal crevasses and associated surface crevassing on the Larsen C Ice Shelf, Antarctica, and their role in ice-shelf instability // *Annals of Glaciology*, Vol. 39, 2012, pp. 208-212.
29. Davide Fugazza, Antonella Senese, Roberto Sergio Azzoni High resolution mapping of glacier surface features. The UAV survey of the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italy) // *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, No. 38, 2015, pp. 25-33.
30. Felipe Gonzalez Toro, Antonios Tsourdos UAV-Based Remote Sensing, Volume 2, Queensland University of Technology, Australia, 2018, 406 p.
31. Fengming Hui, Xinqing Li, Tiancheng Zhao Semi-Automatic Mapping of Tidal Cracks in the Fast Ice Region near Zhongshan Station in East Antarctica Using Landsat-8 OLI Imagery // *Remote Sensing*. Vol. 8. No 1445. 2016. pp. 242-258.
32. Florinsky I. V., Bliakharskii D., Popov S., Pryakhin S. The 2017 catastrophic subsidence in the Dalk Glacier: Unmanned aerial survey and digital terrain analysis // *PeerJ Preprints*, 2018, pp. 1-5.
33. Holt T. O., Glasser N. F., Quincey D. J. Speedup and fracturing of George VI Ice Shelf, Antarctic Peninsula // *The Cryosphere*, No. 7, 2013, pp. 797-816.
34. Ken Whitehead, Chris H. Hugenholtz, Stephen Myshak Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications // *NRC Research Press*, Vol. 2, 2014, pp. 86-102.
35. Kneib M., Miles E. S., Jola S. Mapping ice cliffs on debris-covered glaciers using multispectral satellite images // *Remote Sensing of Environment*, 2020, pp. 18-36.
36. Kurt Stüwe Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // *Australian Journal of Earth Sciences*, No. 36, 1989, pp. 219-241.
37. Luckman A., Jansen D., Kulesa B. Basal crevasses in Larsen C Ice Shelf and implications for their global abundance // *The Cryosphere*, No. 6, 2012, pp. 113-123.
38. Lukas Krieger, Dana Floricioiu AUTOMATIC GLACIER CALVING FRONT DELINEATION ON TERRASAR-X AND SENTINEL-1 SAR IMAGERY // *Remote Sens.* 2015, 7, pp. 305-309.

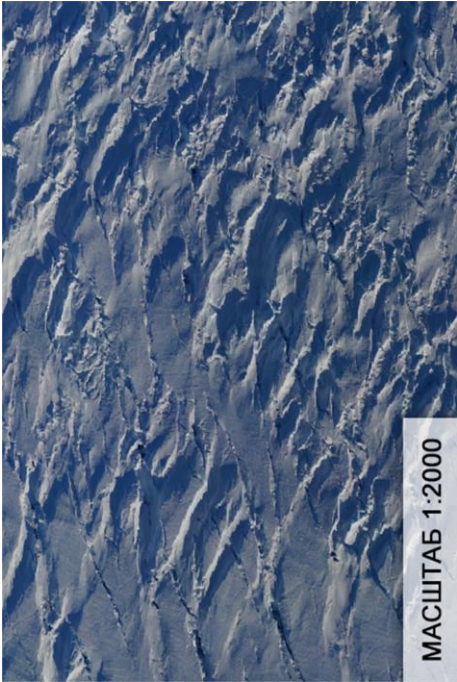
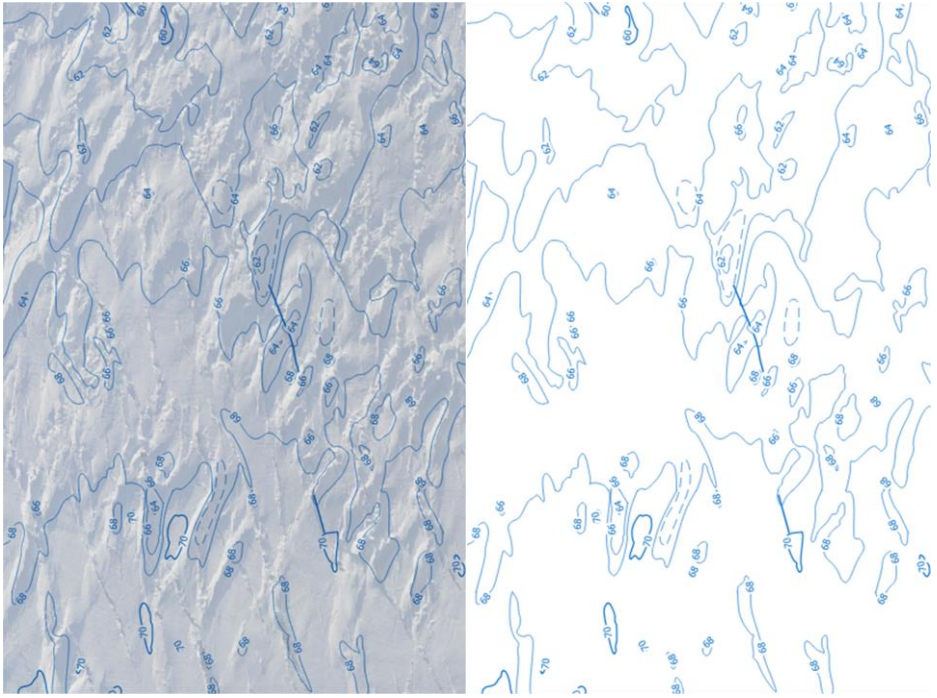
39. Maciej Dąbski, Anna Zmarz, Mirosław Rodzewicz Mapping Glacier Forelands Based on UAV BVLOS Operation in Antarctica // Remote Sensing, No. 12, 2020, 1-22 pp.
40. Neil F. Glasser Theodore Scambos A structural glaciological analysis of the 2002 Larsen B Ice Shelf collapse // Journal of Glaciology, Vol. 54, No. 184, 2008, 133-146 pp.
41. Robert Clancy, John Manning, Henk Brolsma. Mapping Antarctica. A Five Hundred Year Record of Discovery. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014, 319 p.
42. Roger Wheate, Garnet Whyte Mapping glaciers in the interior ranges and Rocky Mountains with Landsat data // U.S. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1386-J-1, 2015.
43. Sam Roberson, Bryn Hubbard Mapping Glacier Structure in Three-Dimensions Using an Optical Borehole Televiewer // Journal of Glaciology, Vol. 56, No. 195, 2010, 143-156 pp.
44. Songtao Ai, Shansi Wang, Yuansheng Li High-precision ice-flow velocities from ground observations on Dalk Glacier, Antarctica // Polar Science, No. 19, 2019, pp. 13-23.
45. Swithinbank, C., Chinn, T. J., Williams, R. S., Ferrigno, J. G. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World; U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-A; United States Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1988.
46. Swithinbank, C., Chinn, T. J., Williams, R. S., Ferrigno, J. G. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: Greenland; U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-C; United States Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1995.
47. Teng Li, Baogang Zhang, Wen Xiao UAV-Based Photogrammetry and LiDAR for the Characterization of Ice Morphology Evolution // IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING, VOL. 13, 2020, pp. 4188-4199.
48. Ute Christina Herzfeld. Atlas of Antarctica. Topographic Maps from Geostatistical Analysis of Satellite Radar Altimeter Data. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, 344 p.
49. Wesche, C., Jansen, D., Dierking, W. Calving Fronts of Antarctica: Mapping and Classification. // Remote Sens. 2013, 5, 6305-6322.
50. Yiming Chen, Chunxia Zhou, Songtao Ai Dynamics of Dalk Glacier in East Antarctica Derived from Multisource Satellite Observations Since 2000 // Remote Sensing. Vol. 12. 2020. pp. 67-85.

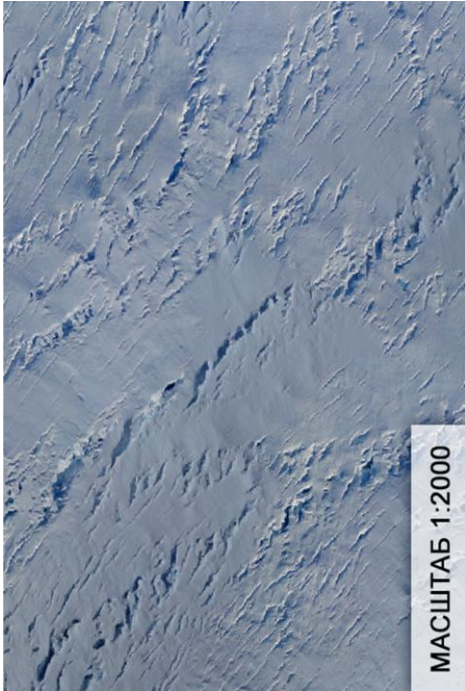


51. Yuskevich A. V. The Contribution of Russian Geodesists and Topographers to Antarctic Mapping // Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.


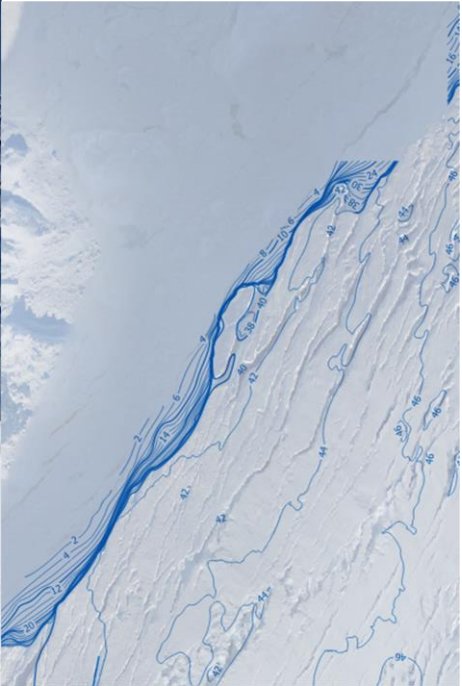
Ресурсы сети Интернет:

1. <https://tankasan.livejournal.com/153389.html> – Аэрофотосъемка в Антарктиде, 3 марта 2021
2. <http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/glacier-recession/observing-glacier-change-space> – Observing glacier change from space, 17 февраля, 2021
3. <https://www.geoscan.aero/en/blog/geoscan-antarctica-russian-uav-are-exploring-sixth-continent> – Geoscan in Antarctica: Russian UAV are exploring the sixth continent, 23 октября 2020
4. <https://www.kramola.info/vesti/letopisi-proshlogo/istoriya-osvoeniya-antarktiki-sovetskimi-polyarnnikami> – История освоения Антарктики советскими полярниками, 29 ноября 2020
5. http://www.ats.aq/documents/recatt/att555_r.pdf – Секретариат договора об Антарктиде. План управления особо управляемым районом Антарктики «Холмы Ларсеманн», Восточная Антарктика, 15 октября 2020
6. <http://www.mollys-bugs.com/ledniki-grenlandii-kangiya/#glaciers> – Ледники Гренландии, 9 апреля 2021
7. <http://www.intaari.ru/ru/tourism/antarctic-tourism/ledyanoy-barer.html> – Ледяной барьер. Шельфовый ледник Лазарева, 15 марта 2021
8. https://data.aad.gov.au/aadc/gaz/scar/display_name.cfm?gaz_id=124054 - Dalk Glacier, 15 февраля 2021
9. <https://bigenc.ru/geography/text/3910585> - физическая карта Антарктиды, 19 ноября 2020
10. <https://cyberpedia.su/4x6aa2.html> - Наблюдения за динамикой фронта выводного ледника Долк с помощью РЛС, 4 марта 2021
11. https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=13130 - Map 13135: Broknes Peninsula, Larsemann Hills: environmental management map, 13 февраля 2021
12. https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=11092 - Map 11092: Broknes Peninsula, Larsemann Hills, 13 февраля 2021

Изображение формы (на снимке и автоматическими изолиниями)	Характеристика формы и технические рекомендации	Пример дешифрирования
 <div>МАСШТАБ 1:2000</div>	<p><u>Тип:</u> Впадина <u>Подтип:</u> Мелкая <u>Встречаемость:</u> Часто <u>Краткое описание:</u> Замкнутая отрицательная форма рельефа Протяженность: от 30 до 100 м Ширина: от 6 до 10 м</p> <p><u>Рекомендации:</u></p> <p>Изображать основными и дополнительными горизонталями.</p> <p>Для основных горизонталей установить общепринятый синий цвет (для изолиний, проходящих по леднику), толщину 0,15 мм для основных и 0,25 мм для утолщенных.</p> <p>Для дополнительных горизонталей установить толщину 0,15 мм, расстояние между пунктирами 1 мм, длину одного пунктира 5 мм.</p> <p>Дополнить отметкой высот (понижений), изобразить в виде точечного знака черного цвета диаметром 0,5 мм.</p>	

<p>Изображение формы (на снимке и автоматическими изолиниями)</p>	<p>Характеристика формы и технические рекомендации</p>	<p>Пример дешифрирования</p>
 <p>МАСШТАБ 1:2000</p>	<p><u>Тип:</u> Рыхлость</p> <p><u>Подтип:</u> Площадная</p> <p><u>Встречаемость:</u></p> <p><u>Краткое описание:</u> холмистый рельеф со слабыми перепадами высот</p> <p><u>Рекомендации:</u></p> <p>Изображать основными и дополнительными горизонталями.</p> <p>Для основных горизонталей установить общепринятый синий цвет (для изолиний, проходящих по леднику), толщину 0,15 мм для основных и 0,25 мм для утолщенных.</p> <p>Для дополнительных горизонталей установить толщину 0,15 мм, расстояние между пунктирами 1 мм, длину одного пункта 5 мм.</p> <p>Дополнить отметкой высот (понижений), изобразить в виде точечного знака черного цвета диаметром 0,5 мм.</p> <p>При появлении мелких и углубленных трещин изображать их линейным условным знаком заданного цвета (синий) и толщины (для мелких – 0,3 мм, для углубленных – 0,5 мм)</p>	

<p>№ (пл.)</p>	<p>Изображение формы (на снимке и автоматическими изолиниями)</p>  <p>МАСШТАБ 1:2000</p>	<p>Характеристика формы и технические рекомендации</p> <p>Тип: Трещина Подтип: Углубленная Встречаемость: редко Краткое описание: узкое углубление с вертикальными стенками и затемненной глубиной</p> <p>Рекомендации: Изображать линейным условным знаком заданного цвета (синий) и толщины (для 0,5 мм).</p>	<p>Пример дешифрирования</p>  
--------------------	---	--	---

Изображение формы (на снимке и автоматическими изолиниями)	Характеристика формы и технические рекомендации	Пример дешифрирования
 <p>МАСШТАБ 1:2000</p> 	<p><u>Тип:</u> Берега <u>Подтип:</u> кругой <u>Встречаемость:</u> локализованы на границах ледника</p> <p><u>Краткое описание:</u> обрыв, выражающийся плотным скоплением горизонталей</p> <p><u>Рекомендации:</u></p> <p>Изображать линейным условным знаком. Толщину контура установить 0,5 мм, длину прямоугольного маркера 1 мм, расположение наружное, цвет синий.</p> <p>В местах откола айсберга изобразить сам айсберг площадным объектом с заполнением в виде синих точек на белой заливке. Контур условного знака сделать равным 0,5 мм по ширине, цвет синий.</p>	